

PLACE ET SIGNIFICATION DES CROÛTES ET ENCROÛTEMENTS CALCAIRES DANS PROFILS DE SOLS ET DANS LES PAYSAGES D'AFRIQUE DU NORD - OUEST

par L. MATHIEU ⁽¹⁾ avec la collaboration
de J. THOREZ ⁽²⁾ et C. EK ⁽³⁾

INTRODUCTION.

Les croûtes et encroûtements calcaires sont des horizons spéciaux qui occupent une place importante dans la définition sols calcimorphes, surtout en Afrique du Nord-Ouest, c'est pourquoi nous avons jugé bon de présenter ce travail à l'occasion du séminaire d'Alger - El-Harrach.

Dans une première partie nous livrons des réflexions que nous a suggérées une analyse bibliographique des travaux effectués principalement en Afrique du Nord et dans le Sud de la France depuis 1947, date du colloque sur les sols méditerranéens d'Alger - Montpellier à l'occasion duquel M. AUBERT leur consacra une première analyse de synthèse.

Dans une seconde partie nous présentons à titre d'exemple les résultats acquis à ce jour par une étude pluridisciplinaire de détail portant sur deux niveaux quaternaires encroûtés situés dans deux régions aux climats très contrastés du Maroc Oriental: plaine aride de Guercif (200 mm), couloir semi-aride de Taza (670 mm).

Notre point de vue est, cependant, avant tout, celui du pédologue cartographe appelé à délimiter des types de sols lors des études préalables aux aménagements agricoles. A cet effet, le pédologue ne doit-il pas choisir et définir certains concepts et critères de classification (*) en fonction du but qu'il poursuit et n'est-il pas éminemment souhaitable qu'il essaye de comprendre les lois de leur répartition dans le cadre temporo-spatiale inscrit dans le paysage (J. TRICART 1965, 1974; G. GAUCHER 1974; J. KILIAN 1974; L. MATHIEU 1971).

Notre préoccupation majeure au départ de nos études était de déterminer quelle signification donner, quelle importance accorder aux croûtes et encroû-

⁽¹⁾ Assistant chaire de la Science du Sol Faculté des Sciences Agronomiques (Gembloux-Belgique), Professeur G. MANIL.

⁽²⁾ et ⁽³⁾ Respectivement Chef de travaux aux services de minéralogie et de géographie physique de l'Université de Liège (Belgique).

(*) Voir travail récent de Ph. ANTOINE (1974) sur l'adaptation de la classification américaine au Maroc.

tements calcaires dans la définition du *profil édaphique* selon le concept proposé par G. MANIL (1956) et retenu par ceux qui font de la « pédologie écologique » (J. P. WACQUANT 1966). Cette conception consiste en la description objective de la dynamique récente du profil imposée par les activités biologiques en insistant spécialement sur la nature des horizons organiques et hémorganiques sur le mode de répartition raculaire, sur la profondeur de pénétration des vers de terre, sur les horizons d'étranglement ou d'arrêt....

Elle peut amener le pédologue écologiste à ne pas se rendre prisonnier de concepts trop statiques qui se manifestent lorsqu'il doit absolument définir un profil concret en fonction de noms prévus dans une classification classique.

Une prise de position temporaire en fonction des nécessités de la pratique n'empêche cependant pas la progression des études fondamentales à des fins génétiques en vue de mieux comprendre les faciès des profils en fonction des divers processus qui ont agi ou agissent encore. Elle est nécessaire pour dégager des lois et aussi tranquilliser les esprits.

C'est à ce double souci qu'ont voulu répondre les auteurs des travaux publiés que nous avons consultés et le même besoin que nous avons éprouvé en entreprenant l'étude présentée dans la seconde partie.

Notre premier but est de susciter le dialogue et les échanges, car il nous paraît important que des méthodes et des concepts de bases soient définis, basés sur l'expérience de chacun pour assurer le progrès. En outre il nous apparaît utile que les jeunes pédologues du Maghreb disposent de l'expérience de leur anciens pour orienter leurs propres travaux.

1ère PARTIE: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Examen des principales hypothèses génétiques formulées dans les études anciennes (avant 1950).

11. PRÉSENTATION SUCCINCTE DES HYPOTHÈSES EN PRÉSENCE.

Dans sa note de synthèse du congrès d'Alger-Montpellier, G. AUBERT (1947) a bien posé le problème de la genèse face aux spécialistes des diverses tendances (géologiques, pédologiques, hydrologiques):

1. Une origine sédimentaire ancienne:

a) pour beaucoup; les unités sont fossiles et datent du quaternaire ancien. Leur formation actuelle est exceptionnelle et minime dans l'ensemble.

b) certains les considèrent comme des niveaux géologiques de calcaire d'autres y voient des dépôts de source ou les assimilent à des dépôts de nappe phréatique.

2. Une origine pédologique:

a) certains pédologues invoquent le lessivage vertical des carbonates, suite à la décalcification d'horizons supérieurs aujourd'hui érodés pour expliquer la mise en place des croûtes et encroûtements.

b) d'autres pédologues pensent que ces formations seraient dues à la remontée des solutions du sol (« per ascensum ») enrichies au contact de la roche-mère; ainsi certaines croûtes ne seraient que des dépôts d'évaporation à la surface des roches calcaires assez poreuses.

12. LES ARGUMENTS EN FAVEUR DE LA PREMIÈRE HYPOTHÈSE.

12.1. Les données de terrain.

Au cours des discussions et dans ses publications G. GAUCHER (1947-1948) apparaît comme le représentant de ceux qui défendent le premier point de vue mais de façon nuancée. Voici quelques points parmi ses observations et ses arguments qui ont retenu notre attention:

— *La localisation et les conditions de gisement des croûtes et encroûtements est un point à préciser lors des études:*

a) ceux-ci se raccordent toujours à des couches perméables qui furent aquifères et surtout à des massifs de roches calcaires.

b) de plus, ils sont d'autant plus volumineux que l'on se rapproche des zones de source.

C'est pourquoi, il pense que ce sont *des dépôts d'émergence, des travertins, des formations souterraines de nappes phréatiques, des encroûtements d'anciens lits d'oued mis en relief par érosion subséquente.*

— *L'extension et la puissance des croûtes impliquent la mise en œuvre de grande quantité d'eau non compatible avec les climats steppiques et désertiques actuels même en tenant compte du facteur temps.*

G. GAUCHER est partisan d'une grande activité hydrologique pour expliquer l'apport du calcaire en masse. Elle a dû se produire sous certains types de climat qu'il qualifie de « climat de la croûte ».

— *Les teneurs élevées en CaCO₃ (85-95%) supposent l'absence de tout horizon préexistant, à travers lequel l'évaporation se serait produite ou dans lequel le calcaire se serait accumulé: les croûtes de calcaire pur ou presque se seraient formées à l'air libre.*

— *La présence de lits de galets consolidés par la croûte indique qu'il s'agit d'anciens thalweg.* Ceux-ci surmontent des trainées verticales de concrétions dans un sous-sol sableux ou limoneux se poursuivant parfois sur plus de 10 mètres qui seraient dues à l'inféroflux.

Au Maroc, G. CHOUBERT (1948) présente plusieurs considérations intéressantes qui paraissent en accord avec les observations de G. GAUCHER et illustrent bien ses conceptions:

— *La formation des croûtes est un phénomène ancien, qui se situe pendant la majeure partie du Cycle tyrrhénien (plus ou moins Amiro-tensiftien).*

Cette opinion repose sur les résultats des études des préhistoriens et de ses propres études stratigraphiques sur le quaternaire marin. En fait leur âge exact compte tenu des industries préhistoriques serait *achéuléen* (au moins tensiftien).

— *Le climat particulier interpluvial nécessaire à leur formation était relativement humide et très chaud.* Ce climat a régné dans le temps entre deux phases de « climat rubéfiant » dont il constitue un climat particulier (le résidu de traitement de la croûte par HCl est rouge). Ce serait le climat optimum réclamé par G. GAUCHER (1948) capable de réaliser la dissolution du calcaire en certains points et son dépôt en d'autres.

— *Les lois de répartition des croûtements sont susceptibles d'aider à l'explication de leur genèse.*

a) *ils sont favorisés par les influences maritimes, défavorisés par les climats désertiques;*

b) *ils sont subordonnés à l'influence lithologique, à la position géomorphologique (terrasses, bordures d'oued en climat plus sec);*

c) *ils sont plus puissants sur les formations calcarifères meubles; les roches siliceuses, argileuses, les calcaires massifs et les dolomies leur sont défavorables;*

d) *ils plus répandus sur les reliefs subhorizontaux et aplanis que sur les pentes et plus développés en plaine qu'en montagne.*

12.2. Des données pétrographiques:

A. Selon l'examen macroscopique G. Gaucher relève deux couches dans les croûtes:

a) *une couche supérieure peu épaisse (10 cm) à structure zonaire: croûte zonaire.*

b) *une couche inférieure plus épaisse, compacte, feuilletée, pulvérulente, granuleuse etc...: l'encroûtement.*

La croûte zonaire est *indépendante de l'autre*. Elle se trouve aussi bien sur des roches de toute nature que sur les encroûtements. Elle lui est toujours postérieure car elle s'insinue dans ses fractures et se termine parfois en sifflet dans sa masse lorsqu'elle ne la traverse pas. *Ce fait montre qu'elle s'est formée « per descensum ».* Les encroûtements sont pour la plupart

d'origine géologiques, en relation avec des phénomènes hydrologiques (confirmation de ce qui précède). Leur richesse élevée en CaCO_3 , (85 à 95%), rend difficile l'acceptation de l'hypothèse de leur formation par enrichissement, que ce soit « per ascensum » ou « per descensum ».

B. *La morphologie et la structure des croûtes, est en rapport avec leur origine:*

a) la structure est vacuolaire, buleuse, si le dépôt s'est produit par dégagement de CO_2 .

b) elle est compacte s'il a eu lieu par concentration de la solution. Le phénomène physique d'interface peut expliquer pourquoi le dépôt s'est amorcé dans les points où il y a changement de niveau de la nappe.

c) elle est stalactiforme et terreuse quand le dépôt a été mis en place par une nappe phréatique.

12.3. *Des principes physico-chimiques:*

Sur le plan de la chimie de base, G. GAUCHER rappelle que le dépôt de calcaire peut se produire sans qu'il y ait nécessairement évaporation, soit par changement de température, de pression, soit par dégagement de CO_2 ou simple phénomène d'interface. C'est le seul fait qui rend plausible une formation actuelle de la croûte dans les conditions particulièrement favorables où ce phénomène pourrait se produire.

Car il est bien connu que les eaux d'Afrique sont fréquemment encroûtantes et entartrent facilement les conduites d'eau par exemple.

G. AUBERT admet difficilement en bloc la première hypothèse, car pour lui elle s'accorde mal avec la position topographique actuelle de ces horizons sur les sommets des collines aussi bien que dans les fonds. Les critiques présentées par d'autres chercheurs (L. YANKOVITCH) ne sont pas à retenir car trop théoriques et générales, non fondées sur les observations précises de terrain.

13. DISCUSSION DE LA SECONDE HYPOTHESE:

G. AUBERT pense que:

1. *Les conditions climatiques actuelles où se trouvent ces sols souvent steppiques, se prêtent mal à l'hypothèse du lessivage vertical.*

2. *Les horizons superficiels capables d'avoir fourni de telles quantités de calcaire auraient dû être d'une épaisseur trop considérable.*

3. *L'horizon supérieur lité (croûte zonaire de GAUCHER) n'a jamais été décrit au sommet des horizons d'accumulation calcaire (C ca). Seul cet horizon est considéré comme horizon de sol par certains pédologues, alors que la partie inférieure crayeuse est interprétée comme un niveau géologique plus ancien.*

4. *L'hypothèse de la formation « per ascensum » ne doit pas être retenue parcequ'elle explique encore plus mal les détails morphologiques des encroûtements.*

L. YANKOVITCH (1947) se déclare partisan de la théorie de formation « per descensum » compte tenu d'une part de l'infiltration de l'eau en climat semi-aride (faible pouvoir de dissolution, saturation rapide en calcaire sur 50-60 cm) et d'autre part de la loi générale de formation des sols zonaux en dehors du cas particulier de la présence d'une nappe phréatique proche de la surface (cas des solontchaks par exemple et non celui des sols à croûte calcaire).

A. ROSEAU (1947) spécialiste de la circulation de l'eau dans les sols réfute la théorie du mouvement « per ascensum » à partir d'observations de terrain et de mesures en champ. Ses deux arguments principaux sont:

1. que les mouvements capillaires ne peuvent engendrer que des dépôts discontinus, ce qui n'est pas le cas de la croûte formée des couches horizontales surmontées par des surfaces planes et ondulées.

2. que les mesures en cases lysimétriques effectuées à l'Institut d'Agriculture d'Alger font condamner le mouvement de l'eau provoqué par une température atmosphérique élevée.

Il présente une *hypothèse mixte* (sédimentaire et pédologique) dans laquelle il considère:

1. que la partie inférieure est *d'origine lacustre*.

2. que la partie supérieure *zonaire* serait due aux mouvements latéraux de l'eau, qui dissout le calcaire en surface et le précipite ensuite après évaporation.

3. que les modules de profondeur seraient engendrés par la dissolution du calcaire de la partie inférieure de la croûte.

14. PREMIERES CONCLUSIONS.

Nous partageons l'avis de G. AUBERT qui dès 1947 concluait:

1. à la confusion sous un même nom, de formations d'origines diverses dont il est vain de vouloir expliquer la formation, par un même et seul processus.

2. à la nécessité d'entreprendre la classification morphologique et d'en étudier la constitution chimique et microscopique.

Nous approuvons les démarches de G. GAUCHER et G. CHOUBERT qui ont utilisé ce que nous appelons la méthode géomorphologique: ces horizons calcaires tellement discutés doivent être étudiés en tenant compte de leur gisement, de leur position par rapport aux formations d'amont et d'aval dans le cadre du modelé du paysage (espace) et dans le contexte de la géologie quaternaire (temps).

2. Classification et genèse des croûtes et encroûtements envisagées dans le cadre du modèle et de la géologie du quaternaire (de 1950 à nos jours).

21. LES TRAVAUX DES GÉOLOGUES ET GÉOMORPHOLOGUES AU MAROC.

I. *La méthodologie.*

Au Maroc, les chercheurs surtout géologues et géomorphologues ont situé les croûtes et les encroûtements dans leur cadre temporo-spatial, pour reprendre l'expression de J. TRICART (1965). Ils interprètent leur genèse en tenant compte de leur situation dans le paysage et dans la stratigraphie quaternaire et aussi de leur structure pétrographique. Ils appliquent ainsi la démarche suivie et préconisée par G. GAUCHER (op. cit.).

II. *Situation temporo-spatiale et genèse.*

En 1954, J. MARGAT, P. TALTASSE, géologues et R. RAYNAL, géomorphologue livrent les résultats de leurs observations portant respectivement sur la partie occidentale du Couloir Sud-rifain et sur le Maroc oriental.

Ces régions à atmosphère sèche, à pluviométrie moyenne ou faible ont été propices au développement de toute une variété de croûtes.

Dans le bassin de la Moulouya, les croûtes s'étalent à la partie supérieure des glacis. Elles sont bien conservées sur les glacis N. 5 (Moulouyen de la classification de 1956) où elles sont d'ailleurs très épaisses et sur le N. 2 (Tensiftien) où elles sont moins épaisses. Sur les glacis 3 et 4 elles n'existent pas d'une manière aussi générale, soit qu'elles se soient mal formées dans certaines régions, soit que peu résistante elles aient été détruites.

Dans le couloir Sud-rifain, les croûtes zonaires sont associées aux formations lacustres, villafranchiennes, à calcaire pulvérulent ou nodulaire. Elles s'associent parfois à des cônes de déjection, à des terrasses et surtout à des dépôts de solifluxion du Quaternaire moyen. Les formations du Quaternaire récent ne sont pas encroûtées.

Vers le S de la plaine du Saïs (compartiment S. du couloir sud-rifain) les croûtes se raccordent aux travertins qui jalonnent les points de source du front N du Moyen Atlas. Elles correspondent aux zones d'étalement des nappes de ruissellement qui en sont issues. Dans cette zone de Fes-Meknès, contrairement au Maroc oriental chacun des climats à croûte postérieur au Villafranchien a donné des « surcroûtements » plutôt que des croûtes bien individualisées et étagées dans les terrasses et glacis.

Admettant que les glacis résultent de l'action des processus d'érosion et d'accumulation qui ont sévi durant les Pluviaux du Quaternaire, R. RAYNAL considère que la croûte aurait été élaborée plus ou moins activement à la fin de chacun d'eux, sauf le dernier (Soltanien).

Il voit d'autres arguments dans le fait que les croûtes sont liées aux

versants polygéniques également façonnés durant les pluviaux et qu'en montagne elles ont comme équivalents, les brèches. Celles-ci en effet, sont constituées de cailloux anguleux d'origine périglaciaire (cryoclastes) qui ont été cimentés par du calcaire après leur mise en place durant les Pluviaux, sauf après de dernier (Soltanien).

III. Morphologie, structure pétrographique et genèse.

En Moulouya, R. RAYNAL donne la description suivante des horizons des croûtes quel que soit leur âge, de bas en haut.

1. *Feuillets minces ondulés* se chevauchant les uns partiellement aux autres (c).

2. *Matériel limoneux de couleur ocre-clair, entrecoupé d'ébauches de feuillets calcaires discontinus*, comportant des morceaux de croûte cassée en provenance de l'horizon sous-jacent (b).

3. *Dalle constituée par une superposition de feuillets*, eux mêmes souvent variés (a).

Cet ensemble peut atteindre 1 m d'épaisseur.

L'interprétation de cette structure est la suivante:

1. *L'horizon (c) correspond aux premières pulsations climatiques vers l'assèchement.*

2. *L'horizon (b) correspond à une reprise du froid humide avec solifluxion.*

L'horizon (a) marque vraiment le maximum de réchauffement et l'assèchement. Dans le couloir sud-rifain, J. MARGAT et P. TALTASSE reconnaissent de bas en haut:

1. *Le calcaire lacustre* moulé par des feuillets ou varves superposés qui forment la croûte. Celle-ci épouse les formes d'un microrelief résultant de l'érosion du calcaire lacustre suite à son exondation.

2. *Des dépôts détritiques, des cailloux roulés*, (parfois étrangers au substratum, parfois de calcaire lacustre remanié), assimilables à des *conglomérats* parce que cimentés par le calcaire, *coiffés par les feuillets varvés.*

Ils en tirent l'interprétation génétique suivante:

1. *La croûte* (feuillets ou varves) *est la conséquence du ruissellement en nappe.*

2. *Les conglomérats* (dépôts détritiques cimentés) *évoquent un transport par l'eau dans un réseau fluvial anastomosé.*

La conclusion générale de ces auteurs est que *la genèse des croûtes dépendrait essentiellement des mouvements latéraux de l'eau chargé de calcaire transportant parfois en mélange des éléments détritiques.*

22. LES TRAVAUX DE J. H. DURAND EN ALGERIE (1952-1959).

1. *Les circonstances et la méthodologie.*

En Algérie, de 1950 à 1959, J. H. DURAND a effectué de nombreuses observations.

La méthode de travail répond à la fois aux suggestions de G. AUBERT et G. GAUCHER (op. cit.). Il situe au mieux les gisements des coupes et des profils qu'il étudie mais sans pouvoir s'appuyer sur des études géomorphologiques et une stratigraphie quaternaire aussi bien établies qu'au Maroc.

Sa première contribution originale est de s'être attelé à bien définir et classer les « croûtes » calcaires de divers types. Il estime en effet que le terme « croûte » est trop vague, car employé indifféremment, pour désigner toute formation blanchâtre incluse dans les séries sédimentaires superficielles quelle qu'en soit l'origine. C'est pourquoi il a fait l'objet de nombreuses discussions stériles.

Sa seconde contribution intéressante est d'avoir mis en œuvre simultanément diverses techniques de laboratoire qui jusque là n'avaient pas encore été appliquées systématiquement aux croûtes calcaires:

— *techniques chimiques* (analyse des éléments totaux et échangeables dans un esprit géochimique).

— *techniques minéralogiques et pétrographiques* (analyses de lames minces, des minéraux denses, morphoscopie des sables).

Le grand intérêt des travaux de DURAND réside dans le fait que toutes les analyses qu'il a effectuées portent sur des échantillons préalablement bien situés et définis.

II. *La genèse et la signification des croûtes d'après leur situation, leur morphologie et leur analyse.*1° *Formation pulvérulente* (calcaire ou sulfatée).

— *Morphologie*: tendre, crayeuse, blanchâtre, très riche en carbonate et chaux, pauvre en éléments.

— *Minéralogie - pétrographie*: L'étude des minéraux lourds montre qu'il n'y a aucune relation entre le calcaire pulvérulent et l'horizon qui le surmonte. Les éléments meubles de celui-ci ont été déposés par dessus l'horizon calcaire déjà en place, et n'en sont pas les produits de décomposition in situ.

En lame mince, le calcaire pulvérulent apparaît généralement formé par une pâte cryptocristalline homogène jamais éteinte, souvent à structure grumeleuse, cimentant des éléments clastiques, quartz de tailles variées, avec des vacuoles parfois tapissées de cristaux de calcite.

— *Origine*: Ce sont des dépôts de calcaires précipités chimiquement dans les lacs dont les eaux étaient riches en carbonates de chaux. Ils constituent la phase migratrice soluble dans des sols rouges, en cours de formation dans le bassin en conditions biostatiques.

— *Signification*: en fonction des résultats de l'analyse des minéraux denses J. H. DURAND estime que l'ensemble, horizon superficiel meuble et horizon calcaire pulvérulent *ne forme pas un sol à croûte*.

2° *Croûte zonaire*.

— *Morphologie - Gisement*: Formation de calcaire très dur, peu épais (une dizaine de cm), d'aspect sublithographique et présentant une cassure rubannée, formée par la superposition de lits alternativement clairs et colorés; disposés en général suivant une direction subhorizontale. Vers le bas elle passe à une partie plus tendre non litée. Elle peut aussi, recouvrir des roches calcaires ou non qu'elle masque.

— *Minéralogie - Pétrographie*: Les minéraux denses indiquent qu'il y a une indépendance relative entre cette formation et celles qui l'encadrent (sols superficiels, calcaire blanc et horizons sous-jacents).

En lame mince, elle apparaît pauvre en débris clastiques.

Elle présente aussi une structure zonaire parallèle à la surface topographique superposée à une microstructure granuleuse cryptocristalline due à un dépôt rapide du calcaire dont les cristaux se déposent une fois pour toutes sans possibilités d'accroissement postérieur (différence avec les travertins).

— *Origine*: Elle s'est formée par le dépôt du calcaire précipité au sein d'une nappe d'eau chargée de bicarbonate de chaux ruisselant sur des pentes douces où elle s'étale en favorisant l'évasion du CO₂. Le ruissellement s'est produit par intermittence, le durcissement des feuillettes se produisant lors de l'exposition à l'air, qui favorisait aussi la fissuration de la masse calcaire, engendrant des sortes de « dalles ». Lors d'un nouveau ruissellement celles-ci sont recouvertes et enveloppées par de nouveaux feuillettes qui en épousent les irrégularités et s'insinuent dans les fissures qui les séparent.

— *Signification*: Les minéraux semblent à nouveau indiquer qu'il n'y a pas de relation entre le sol superficiel et la croûte. La pauvreté en éléments plastiques plaide en faveur de la formation à l'air libre et non dans un sédiment déjà en place, dont on retrouverait de nombreux éléments.

3° *Nodules pulvérulents*.

— *Morphologie - Gisement*: Amas de carbonate de chaux pure qui se rencontrent le plus souvent dans les argiles surmontées de bancs calcaires. Il sont homogènes dans la masse, tendres, mamelonnés à surface poussiéreuse.

— *Minéralogie - Pétrographie*: Les associations minéralogiques des nodules sont semblables à celles des argiles qui les englobent.

Les lames minces montrent qu'ils sont constitués d'une pâte calcaire crypto-cristalline pauvre en débris clastique, à nombreuses plages de calcite diffuse et à nombreuses vacuoles.

— *Origine*: Ils se sont formés par ségrégation du calcaire au moment du dépôt du sédiment dans lequel ils se trouvent.

— *Signification*: Formée dans la masse du sol par concentration et ségrégation du calcaire dans certains microsites, les nodules ont une origine que l'on est tenté d'attribuer à la pédogénèse⁽¹⁾. Cependant cette accumulation relative peut être due à un simple phénomène physique (interface de GAUCHER) sans qu'intervienne des activités biologiques. Selon J. H. DURAND ce processus se rattache à la lithogénèse pure.

4° *Pseudomyceliums*.

— *Morphologie*: Amas filiformes, constitués par du gypse ou du chlorure de sodium, J. H. DURAND les considère comme des homologues salins des nodules.

— *Origine*: Ils tapissent les canalicules plus ou moins larges qui limitent les granules d'argile dont ils sont exsudés. Ils ne se développent que dans les horizons argileux.

5° *Encroûtements*.

— *Morphologie*: Formations dures, d'aspect plus ou moins scoriacé et gréseux, formées par des sédiments cimentés par du calcaire, du gypse et même des sels divers.

— *Minéralogie - Pétrographie*: Les minéraux denses indiquent que les sédiments incrustés sont soit d'origine variée soit de même origine tandis que la morphologie des quartz atteste qu'ils ont été déposés sous l'action de divers agents de transport (vent, mer...).

Les lames minces révèlent la présence de nombreux éléments clastiques (quartz, calcite, tourmaline) cimentés par une pâte cristalline calcaire, très fine ou crypto-cristalline, à structure souvent grumeleuse avec des vacuoles allongées souvent remplies de calcite.

— *Origine*: Les encroûtements calcaires naissent dans la frange capillaire, ou zone d'aération, d'une nappe phréatique subissant l'action de la température du lieu, par dépôt de calcaire dû à l'évasion du gaz carbonique d'équilibre, cimentant le sédiment et le transformant en un grès calcaire.

— *Signification*: Le sédiment qui surmonte la zone d'encroûtement continue à subir l'action du climat du lieu. Le sol qui prend naissance est le sol de la région. De là, la tendance à considérer selon J. H. DURAND,

(1) erreur que M. J. H. DURAND nous a reprochée.

que ces encroûtements seraient due à un lessivage du calcaire des horizons superficiels.

6° *Racines calcarifiées.*

— *Gisement*: Elles sont généralement situées à la base des encroûtements dont elles constituent un *aspect particulier*.

— *Minéralogie - Pétrographie*: En lame mince, à côté du grès à ciment calcaire qui forme la matrice, apparaît un mamelon de pâte grumeleuse zonée, tapissant le vide laissé par la racine, pauvre en éléments classiques.

— *Origine*: Elles se forment par la concentration des solutions calcaires du sol et précipitation subséquente du carbonate de chaux au niveau de la zone pilifère de la racine.

Après disparition de celle-ci le vide est tapissé de cristaux plus gros dont l'origine se situe dans la précipitation du carbonate apporté par l'eau d'infiltration qui y chemine préférentiellement.

7° *Nodules concrétionnés.*

— *Morphologie*: Ce sont des nodules arrondis ou mamelonnés durs, de nature calcaire (ou ferrugineuse).

— *Minéralogie - Pétrographie*: Les associations minéralogiques sont qualitativement les mêmes dans les nodules que dans la terre fine du sol qui les entoure.

Les lames minces des nodules montrent une pâte cryptocristalline claire, de couleur brunâtre, formée de calcite, comprenant des plages mal délimitées, de filonnets, de calcite cristalline et des traces d'oxyde de fer plus ou moins diffus. Les éléments clastiques rares ne contiennent que du quartz.

— *Origine*: Ils se forment dans le sol lui-même et sont les produits du lessivage du calcaire qui peut encore se poursuivre actuellement.

— *Signification*: Leur situation dans les horizons de profondeur de certains sols (inondés ou non en hiver) ajouté à l'argument des minéraux denses prouvent qu'ils sont les produits de la pédogenèse par lessivage vertical du calcaire. Ce sont là, les seules accumulations avec éventuellement des patines que J. H. DURAND⁽¹⁾ considère comme pédogénétiques.

8° *Patines calcaires.*

— *Gisement*: Elles se rencontrent à la partie supérieure des roches-mères de certains sols calcaires.

— *Pétrographie*: La patine présente en lame mince une pâte cryptocristalline.

(¹) Confirmation écrite dans un échange de correspondance, vacuolaire, riche en plages de calcite.

— *Origine*: Elles naissent en milieu perméable et à l'air libre. Elles proviennent de la dissolution du calcaire qui se dépose au sommet de la roche-mère inaltérée. Ce processus est comparable à celui qui engendre les croûtes zonaires mais son développement est moindre.

— *Signification*: A notre point de vue ces processus seraient plus proches de la sédimentation que de la pédogenèse (morphogenèse ou lithogenèse) J. H. DURAND les attribuerait éventuellement à la pédogenèse.

9° *Efflorescences salines.*

— *Morphologie - Gisement*: Ce sont de fins cristaux de sels qui se forment à la surface du sol en couches toujours minces. Leur croissance est limitée, soit qu'elles sont détruites par le vent, soit qu'elles ne puissent se développer d'avantage.

— *Origine*: Elles sont dues à l'évaporation « in situ » d'eaux salées dont le taux de saturation guide leur destruction ou leur croissance.

— *Signification pédologique*: Parmi les formes d'accumulation décrites par DURAND, seules ces efflorescences se forment « per ascensum » mais dans des sites particulier où les eaux sont salées (cas des Solontchaks cité par YANKOVITCH 13).

III. *Le cadre temporel de la formation des croûtes et encroûtements.*

J. H. DURAND a essayé de localiser la formation des croûtes et encroûtements dans le cadre de la chronostratigraphie du Quaternaire marin de la Méditerranée utilisée alors en Algérie. Il est regrettable, comme nous l'avons déjà dit, qu'il n'ait pu disposer d'une chronologie continentale bien mise au point. Par conséquent, la comparaison avec les résultats obtenus au Maroc est assez approximative.

Pour effectuer ses datations et reconstituer le cadre dans lequel s'est déroulé la pédogenèse, il s'est inspiré de la théorie de la biorhesistase d'ERHART:

Les sols rouges (Terra Rossa) se seraient formés à l'amont, en climat chaud et humide sous une forêt à allure tropicale (biostasie) tandis que se déposaient en aval, les calcaires lacustres et les formations pulvérulentes.

Ces conditions auraient régné du Villafranchien supérieur (Calabrien II - Pebble culture, post-Moulouyen) au Tyrrénien III, post-Tensiftien du Maroc) où se situe une pulsation brusque à partir de laquelle s'installe un climat méditerranéen humide qui en se desséchant aboutit à l'actuel.

La formation des croûtes zonaires se situe durant une période de rhexistase due à l'orogenèse au cours d'une régression pré-sicilienne.

L'érosion des sols rouges (Terra Rossa) en amont et leur dépôt subséquent dans les plaines (limons rouges) se seraient produits au moment de la pulsation

brusque du Tyrrhénien. C'est à ce moment que *les nodules farineux* se sont individualisés dans leur sein.

Les nodules concrétionnés se forment depuis cette époque car le climat est devenu trop sec pour entraîner le calcaire au loin.

IV. *L'importance pratique des croûtes et des encroûtements.*

Sur le plan pratique J. H. DURAND a apporté certaines données sur les propriétés physiques des croûtes qui sont intéressantes au point de vue écologique:

1. *Les croûtes zonaires et les encroûtements calcaires ont une faible porosité* et risquent d'être imperméables s'ils ne sont pas fissurés (nappe perchée après l'irrigation).

2. *Les calcaires pulvérulents par contre ont une porosité plus forte* et sont plus perméables. Grâce à la finesse de leur grains, leur capacité de rétention d'eau est bonne. Ils présentent une certaine humidité toute l'année, même en l'absence de toute nappe phréatique voisine.

23. LES TRAVAUX DE J. WILBERT AU MAROC (1962).

I. *Les circonstances et la méthodologie.*

J. WILBERT se fixe aussi comme but *de bien définir les termes, sources de polémiques et de confusion* parce qu'utilisés trop souvent avec des acceptations différentes.

Il a travaillé dans *l'esprit du pédologue cartographe*, soucieux de tenir compte des facteurs complexes qui dans l'espace comme dans le temps ont pu influencer la genèse des croûtes.

Bénéficiant d'une stratigraphie du Quaternaire bien au point, il propose une répartition des divers faciès de croûtes en fonctions des formes du paysage et de leur âge. Sur cette base, il présente des hypothèses génétiques pour chacun des faciès.

II. *La genèse et la signification des divers types de croûtes et encroûtements en fonction de leur morphologie et de leur situation dans le cadre temporo-spatial de l'évolution du modèle.*

1° *La croûte lamellaire.*

A. Morphologie - Situation spatiale: Elle correspond à la croûte zonaire de DURAND dont il adopte d'ailleurs la définition, donnée ci-dessus.

Elle recouvre de grandes surfaces sur les piedmonts des reliefs calcaires et diminue d'épaisseur lorsqu'on s'en éloigne.

B. Situation temporelle: Ce type de croûte se rencontre surtout les alluvions du *Villafranchien supérieur ou Moulouyen*.

C. Origine: Ce phénomène de grande ampleur rappelle nettement la *sédimentation*. Il suppose le *ruissellement* plus ou moins *diffus*, d'eaux chargées de calcaire, circulant à allure réduite, stagnant puis s'évaporant.

La croûte lamellaire peut provenir aussi du remaniement superficiel de l'encroûtement tuffeux dont il va être question.

D. Signification: L'avis de WILBERT rejoint celui de J. H. DURAND. Ce faciès de croûte est d'origine géologique ou sédimentaire, tributaire d'un mouvement latéral de l'eau carbonatée.

2° *La croûte tuffeuse ou encroûtement crayeux.*

A. Morphologie - Situation spatiale: Masse blanchâtre d'aspect diffus contenant 50 à 80% de CaCO_3 parfois stratifié se présente souvent au pied des reliefs calcaires sur des grandes surfaces de piedmont et le long des cheminements préférentiels de nappes d'eau dont il est possible de retracer le cours. Cet encroûtement est souvent associé aux croûtes lamellaires qui le couvrent.

B. Situation temporelle: Se retrouve surtout sur les niveaux villafranchiens.

C. Origine: Non seulement *formations lacustres* (voir DURAND) mais aussi *dépôts de type très humide*, très riches en carbonate de calcium, de structure litée (dans des chenaux fluviaux par exemple) *d'imprégnation de terrain en place à partir de la surface*.

En général, le manque de cristallisation du carbonate plaide en faveur de ces conditions de dépôt.

D. Signification: Il s'agit donc à nouveau d'une formation de nature plutôt géologique que pédologique.

3° *L'encroûtement nodulaire* (nodulaires concrétionnés de DURAND).

A. Morphologie - Situation spatiale: Les nodules sont des concrétions dures, sphériques ou allongées à structure concentrée ou rayonnée autour d'un canalicule, vide ou contenant rarement des débris organiques. Dans le sol, ils sont disposés en chapelet ou parfois ramifiés comme des racines.

Les encroûtements les plus intenses se forment souvent dans des sols peu profonds. S'il sont très épais il faut faire intervenir une succession d'apports sur lesquels la pédogenèse crée un encroûtement au niveau des radicelles de la végétation.

Ce faciès peut aussi se répartir en profondeur par *descente des eaux de percolation de nappe perchée* ou d'interfluve à la suite d'une hétérogénéité de la texture du substratum.

Les encroûtements nodulaires forment aussi, souvent, *le cailloutis de base d'un dépôt alluvial postérieur ayant remanié un sol à encroûtement antérieur*.

B. Situation temporelle: Ce faciès est particulièrement caractéristique des périodes suivantes: Moulouyen, Amirien, (en région semi-aride), Tensiftien (très typique) et Soltanien (Rharh).

C. Origine: Les nodules se formeraient par suite d'un *phénomène d'interface*. Le calcaire de la solution du sol ou d'une nappe se serait déposé par suite du dégagement de CO₂ dans les diverses cavités du sol d'origine biologique ou physique.

Le calcaire est apporté en période humide, il précipite en période sèche (sécheresse climatique ou pédoclimatique due à l'action radiculaire par exemple). Il y a enrichissement en calcaire par apport, par cheminement d'eau de nappe d'oued par exemple.

D. Signification: Ce faciès résulte dans certaines circonstances des processus nettement pédologiques et dans d'autre de processus sédimentaires (percolation en profondeur d'eau de ruissellement). Il se situe au point de jonction entre la morphogénèse et la pédogénèse.

4° *L'encroûtement stalactiforme.*

A. Morphologie - Situation spatiale: Faciès particulier, sous forme de petites stalactites fixées sous les cailloux dans les terrasses d'oued, dont la partie supérieure n'est pas recouverte par le calcaire.

B. Situation temporelle: Faciès relativement ubiquiste.

C. Origine: Il s'agit probablement d'un dépôt allogène par nappe circulante dans les traînées caillouteuses filtrantes.

D. Signification: Ce faciès résulte de phénomènes hydrogéologiques et sédimentaires.

5° *L'encroûtement de type diffus (faciès palustre).*

A. Morphologie - Situation spatiale: Masse terreuse peu consolidée par le calcaire dont l'imprégnation de l'argile jaune ou rose, donne une couleur jaune sale ou blanche à la masse de l'horizon. Les traces de racines fossiles sont nombreuses et soulignées par des liserés soit argileux rubéfiés, soit ferrugineux (fer réduit, réoxydé).

B. Situation temporelle: Faciès non signalé comme plus particulièrement spécifique de l'une ou l'autre époque.

C. Origine: J. WILBERT, le considère comme un faciès de gley, de milieu palustre dans lequel des conditions réductrices se juxtaposent à des boues calcaires.

D. Signification: Il s'agit donc d'une formation d'origine mixte, à la fois sédimentaire et pédologique.

6° *Conglomérats calcaires.*

A. Morphologie - Situation spatiale: C'est un faciès latéral de l'encroûtement calcaire en interstratifié avec les horizons à nodules.

Il s'agit souvent d'une *phase terminale d'alluvionnement torrentiel* qui se cantonne dans des *terrasses d'oued* ou des chenaux sur des surfaces de piedmont. Les galets sont soudés par un ciment calcaire fortement cristallisé, dur.

B. Situation temporelle: Ces accumulations dont l'épaisseur dépasse souvent le mètre apparaissent spécialement sur les niveaux du Salétien et du Tensiftien (climats rigoureux).

C. Origine: Ce faciès provient de la précipitation du calcaire, amené par de l'eau circulant latéralement dans les nappes alluviales.

D. Signification: Cette formation est d'origine sédimentaire.

7° *Encroûtement en tâches de calcaire pulvérulent.*

A. Morphologie - Situation spatiale: Formation de calcaire presque pur, pulvérulent, en masse verticale très large ou bien en tâches plus réduites.

B. Situation temporelle: Il s'est produit à plusieurs reprises: au Villafranchien (intense), Amirien (fréquent, plus restreint), Tensiftien (rare), Soltanien (assez rare) et au Rharbien (à la base des Tirs).

C. Origine: Comme la formation des nodules calcaires, qui se retrouvent dans des sédiments argileux. Le milieu est suffisamment humide pour qu'il se produise une décalcarisation de surface et une percolation, de l'eau, plus ou moins intense. En profondeur les argiles formées sont gonflantes et la dessiccation entraîne facilement la formation de fissures verticales, favorables aux phénomènes d'interface où le calcaire entraîné de la surface se précipite.

D. Signification: Phénomène purement pédologique.

III. *Synthèse concernant la genèse des croûtes et encroûtements calcaires en fonction de leur situation temporo-spatiale.*1° *L'influence du gisement.*

Ces divers types d'encroûtement se rencontrent donc dans la zone d'influence des sources de calcaire, que ce soit par *épandage fluvial*, par circulation de nappes ou par *remaniement sur place du calcaire des roches-mères*. Certaines roches ne contenant pas de calcaire peuvent en former par *dégradation*: c'est le cas des basaltes.

2° *L'influence des matériaux sédimentaires.*

a) *Les matériaux tendres, alluvions et colluvions sont le lieu de prédilection pour la genèse de ces accumulations*, car ils correspondent à des épandages avec circulation d'eau chargée de solutions carbonatées.

b) *Les roches argileuses telles les marnes, très susceptibles à l'érosion n'ont pas donné lieu à des ruissellements chargés de calcaire.*

3° *L'influence du « climat ».*

D'après J. WILBERT, le « climat du sol » compte plus que le climat des météorologistes. Il dépend de la nature de la roche-mère, des possibilités d'approvisionnement en calcaire, des possibilités d'apports fluviatiles lents ou brutaux et du régime hydrique.

A notre avis le terme « climat du sol », utilisé par cet auteur n'est pas très bien choisi. Nous préférierions parler de « l'environnement édaphique » ou des « conditions de gisement ».

4° *La succession des divers faciès dans le temps et dans l'espace.*

Certains faciès sont typiques de certaines périodes du Quaternaire ou de certaines formes de relief. Cependant, il faut noter qu'ils peuvent aussi se succéder très aisément les autres, sans que chacun d'eux, ne soit précisément caractéristique d'un phénomène zonal.

Ils peuvent se superposer verticalement dans un même dépôt d'une seule période, soit par exemple:

- a) Croûte lamellaire sur encroûtement crayeux (cas fréquent).
- b) Encroûtement nodulaire sur limon argileux à tache (cas du Villafranchien qui peut présenter tous les faciès).
- c) Encroûtement nodulaire sur limon rouge argileux à tâche (non observé en surface par J. WILBERT).
- d) Encroûtement crayeux se juxtaposant à l'encroûtement nodulaire sans transition de l'un à l'autre.

24. LES TRAVAUX DE A. FOURNET EN TUNISIE (1969).

I. *Le fond d'observation.*

Dans la partie descriptive de son travail consacrée aux sols de la dorsale tunisienne qui résulte d'une longue expérience de cartographie, A. FOURNET semble considérer que les croûtes sont des formations anciennes héritées par dessus lesquelles les sols actuels se sont développés. C'est ainsi qu'il emploie les termes de Rendzine brune ou rouge sur encroûtement ou croûte calcaire remaniée, de sol châtain sur matériau rouge érodé et sur encroûtement calcaire des cônes III.

De plus il situe très bien les croûtes et les encroûtements dans le cadre temporo-spatial qu'il déduit de l'analyse du modèle quaternaire. A partir d'un niveau de base défini, il recense 6 niveaux de référence en plaine comme en montagne qu'il met en parallèle avec les niveaux de l'échelle chronostratigraphique marocaine de 1956, dite classique. Il constate que la composition et

la forme de leurs couvertures dépendent de la nature et de la disposition des reliefs qui ont alimenté leurs épandages au cours des périodes humides et froides (niches de nivation en montagne entre 400-900 m) témoins de périodes pluviales).

Les glacis lui apparaissent scellés par d'importantes accumulations de calcaire, celles-ci sont enracinées profondément dans le substratum, et leur importance est sans aucune mesure commune avec l'épaisseur des sols qui les surmontent. Elles sont en outre, relativement indépendantes vis à vis des roches ou sédiments qu'elles encroûtent. Il relève aussi que leur épaisseur et leur intensité de développement se réduisent progressivement depuis le niveau le plus ancien (Villafranchien-Moulouyen-niveau VI) jusqu'au plus récent niveau III, à partir duquel la croûte disparaît (niveau II - I - Soltano-Rharbien).

La description soignée des encroûtements lui montre que ceux-ci se développent soit: sur des apports grossiers, des cônes d'alluvions et des colluvions de versants, soit sur la roche en place dans la montagne ou dans les interfluvés des piedmonts.

Il estime que dans le premier cas, il lui est permis de différencier les strates sédimentaires, des horizons pédologiques bien que souvent les deux coïncident. Le second cas réalise d'après lui, le profil idéal sur lequel il est possible de suivre l'évolution structurale du matériau quel que soit le niveau étudié.

II. Nomenclature - description et interprétation.

Voici la succession des horizons d'un encroûtement telle qu'il l'a décrite de bas en haut.

1) *L'horizon d'altération* consiste le plus souvent en une roche en place ou en un dépôt de texture fine: marne, calcaire crayeux, alluvion.... Dans la masse pâteuse, altérée de ces roches (surtout sur marne) il apparaît souvent une structure polyédrique et une couleur jaune de fond passant à un pseudogley à taches grisâtres et verdâtres vers le haut.

2) *L'horizon tacheté*: présente en plus de la structure prismatique et de l'aspect pseudogley, des inclusions calcaires du type nodules amas friables, chandelles résultant de l'empilement des nodules orientés verticalement parallèlement aux faces des agrégats de structure prismatique ou polyédrique vers la partie supérieure.

La disposition de ces nodules évoque d'après l'auteur une circulation des solutions orientée par une structure particulière dans les lits souterrains d'anciens oueds. Il pense que la formation de ces inclusions pourrait résulter d'un dépôt effectué sous l'action intermittente et répétée d'une hydromorphie transitoire prouvée par la présence d'un pseudogley.

3) *L'encroûtement calcaire*: au sommet de l'horizon précédent il y a anastomose des amas, nodules en chandelles, l'accumulation calcaire devient continue, la fraction fine s'enrichit en calcaire, les structures prismatiques et polyédriques s'estompent c'est la passage à l'encroûtement. La macroporosité disparaît et la structure passe d'une orientation verticale à une orientation horizontale par stratification régulière de lamelles: les plus élevées, parmi ces dernières ne contenant pratiquement que du calcaire et quelques résidus grossiers. C'est la plasticité de cette masse supérieure, qui serait la cause d'après A. FOURNET, de la genèse de la croûte par décollement épisodique de l'encroûtement, phénomène qu'il désigne par le terme de *feuilletage*. L'encroûtement se produit au contact d'une roche dure altérée en montagne, soit à partir d'un épandage fin ou d'un apport détritique sur les cônes alluviaux, soit au sommet de l'horizon tacheté sur marne.

4) *La croûte calcaire*: se distingue de l'encroûtement par la perte de toute structure apparente et une augmentation de capacité. Ce sont les feuilletés superficiels qui se sont transformés en croûte, en s'épaississant et en s'indurant. Leur couleur change, de blanche puis brun à brun gris pâle dans les encroûtements (niveaux V et III) elle devient brun-rosé. Dans la partie plane des glacis, elle prend la forme de pavés ou niches (pavés arrondis) là où le ruissellement faisait place à une dessiccation en réseau polygonal) dans un milieu de texture homogène. Elle est composée de lits qui semblent indiquer d'après A. FOURNET une succession de dépôts précédents une phase de redissolution qui amène la formation de tubules et de cavités visibles en lame mince. Il y aurait donc une nouvelle circulation d'eau orientée vers le ruissellement après la mise en place de l'encroûtement.

5) *La pellicule zonaire*: revêt d'une couche continue chaque élément de croûte, en surface et aussi sur les parois latérales et une partie de leur face inférieure dans le cas des pavés. L'épaisseur de la zonation est fonction de l'âge des encroûtements. Elle est plus épaisse sur les plus anciens. Les zones montrent une alternance de lits composés en majorité de calcaire mais avec intercalation de lignes rouges et noires, contenant des oxydes de fer. A. FOURNET voit dans ce fait, la démonstration de ce que les sols préexistants sur ces encroûtements ont connu une circulation de ces éléments dans leur masse et probablement une certaine rubéfaction. Ce serait donc là une manifestation pédogénétique.

Ce chercheur est embarrassé pour établir le lien qui existe entre l'encroûtement ou la croûte et le sol qui les surmonte (c'est là le cœur du problème qui a également retenu notre attention!). A ce propos, il considère que la différenciation des horizons ne doit pas être considérée comme un phénomène instantané: elle s'étale sur une longue période de temps au cours de laquelle se produisent une série d'événements qui se situent à mi-chemin entre la sédimentation et l'érosion.

Il estime qu'après l'apport successif de strates sédimentaires riches en calcaires, il peut y en avoir eu un; non ou peu calcaire et qu'il indéniable que la pédogenèse a participé au scellement de l'encroûtement en favorisant l'entraînement du calcaire en profondeur.

L'argument fournit à l'appui de cette assertion par A. FOURNET, est qu'il n'est pas possible de comprendre autrement que la limite des horizons organiques et des horizons encroûtés également celle de l'implantation des racines. A partir de là il conclut que l'horizon d'accumulation calcaire, habituellement considéré comme C_{ca} serait le véritable horizon B illuvial issu de l'entraînement vertical et oblique de ses constituants. *Il est satisfait de constater des lors qu'il est plus aisé de coder les horizons et de classer les sols encroûtés de la zone méditerranéenne.*

25. LES TRAVAUX RÉCENTS DES PÉDOLOGUES DE L'IRAT EN ALGÉRIE (1974)

En Algérie, lors des études préalables aux aménagements agricoles, les pédologues de l'IRAT qui utilisent largement la géomorphologie comme outil de prospection (J. KILIAN 1974, G. GAUCHER 1972, 1974, J. TRICART 1965, 1974, L. MATHIEU 1971) situent très clairement les croûtes et encroûtements calcaires dans le cadre du modelé (espace) et de l'évolution quaternaire (Temps).

Ils arrivent ainsi selon M. RAUNET (1974) à définir « l'état d'équilibre actuel des unités morpho-pédologiques, la nature de leurs sol et le sens de leur évolution et en définitive les contraintes qu'elles présentent pour la mise en valeur du milieu ».

Ainsi M. RAUNET considère que sur les glacis, formes héritées des phases pluviales du Quaternaire, l'évolution est lente, compte tenu des interactions morphogenèse-pédogenèse. Les caractères des pédogenèses anciennes y sont fortement imprimés. Les glacis ancien (du Plio-Villafranchien, Moulouyen ou Tensiftien) offrent des dépôts superficiels rubifiés sur le Substratum tronqué, caractérisés par une « argilification intense in situ après leur dépôt ».

Les limites calcaires, qui d'après ce chercheur se seraient formées *postérieurement* au dépôt des sols rouges, constituent un obstacle à la mise en valeur lorsqu'elles sont proches de la surface.

De ses études dans la région de Bechloul, F. THIBOUT (1974) déduit que les croûtes calcaires sont le résultat de phénomènes pédogénétiques anciens du Quaternaire ancien et moyen. Les sols contemporains de leur formation ont été érodés au cours de diverses phases climatiques. *Elles jouent actuellement le rôle de roche-mères dans le processus de pédogenèse actuelle.* Elles ont permis la conservation des formes anciennes. Elles sont incitées par l'érosion régressive et interviennent dans l'alimentation en calcaire des zones situées en contrebas.

De la somme de ses observations F. THIBOUT conclut que les sols sur croûtes calcaires sont « le résultat de processus actuels et anciens, qui ont contribué à donner à ces sols d'une part la profondeur et d'autre part leurs qualités physiques et chimiques » (érosion par décapage du sol superficiel, faible évolution due à la pédogenèse en milieu calcimorphe drainant).

Ces deux auteurs relèvent aussi une diminution de l'importance des encroûtements depuis les hauts niveaux quaternaires jusqu'aux plus récents (Moulouyen-Tensiftien), leur disparition dans les terrasses les plus basses (Soltanien-Rharbien).

26. CONCLUSION - SYNTHÈSE.

Les auteurs des divers travaux examinés ci-dessus se sont donc souciés de décrire les croûtes et les encroûtements en les situant objectivement dans le modèle et en les décrivant macromorphologiquement.

Certains ont proposé des nomenclatures précises (J. H. DURAND et J. WILBERT) qui manifestement retiennent les mêmes faits d'observations.

J. H. DURAND a de plus, procédé à l'analyse de lames minces qui l'ont aidé à mieux comprendre les processus de mise en place et l'origine des croûtes et encroûtements.

Cette technique nous paraît absolument nécessaire pour saisir le mécanisme des processus internes.

Les travaux exécutés au Maroc se signalent par une meilleure définition du milieu géomorphologique dans lequel les croûtes et les encroûtements se trouvent intégrés. Nous considérons leurs données comme très importantes pour l'interprétation des faits de terrain.

Les divers auteurs retiennent une origine géologique ou sédimentaire, due à des mouvements latéraux d'eau carbonatée, pour ce qui est des croûtes les plus épaisses de structure lamellaire ou zonaire, parfois conglomératique (MARGAT *et al.*, WILBERT) et des encroûtements tuffeux, crayeux.

Sur la base des études des minéraux lourds, J. H. DURAND estime qu'il n'y a pas de rapport entre le limon superficiel et les croûtes. Les autres auteurs ne paraissent pas s'attarder à ce problème.

Certains encroûtements (nodulaires, palustres), certains nodules et les pseudo-mycéliums sont considérés comme des horizons pédogénétiques par J. H. DURAND et J. WILBERT.

J. H. DURAND a situé la genèse des croûtes dans le cadre de la théorie de la bio-rhexistase d'ERHART: leur genèse se situerait en période de biostase lorsque les carbonates lessivés de sols rouges formés en montagne se déposent sur les piedmonts et en plaine.

Les conceptions et les méthodes des recherches qui se dégagent des études minutieuses de A. FOURNET en Tunisie, des travaux récents des pédo-

logues de l'IRAT en Algérie ont aussi retenu notre attention. Les prises de position de ces chercheurs vis à vis des croûtes calcaires dans les sols est claire et nette....

Avec leurs prédécesseurs ils admettent que *les croûtes et encroûtements sont des formations anciennes qui se sont mises en place à plusieurs reprises au cours de l'évolution du modelé du Quaternaire.*

A. FOURNET et F. THIBOUT les considèrent explicitement comme les roches mères de certains sols actuels. J. BOULAIN (1957) dans la partie descriptive et analytique de ses travaux dans la plaine du Chélif semblait avoir les mêmes conceptions. Il ne s'y-attarde guère dans la partie interprétative qui prend une orientation nettement plus pédogénétique. C'est pourquoi ses études sont examinées en 4 ci-après.

Entre ces chercheurs dont les méthodes d'approche sont cependant assez semblables, il existe un point de contradiction qui nous paraît important c'est celui de la signification génétique de la croûte zonaire ou lamellaire: dépôt de ruissellement superficiel durci à l'air pour J. H. DURAND et J. WILBERT, résultat d'une circulation interne d'eau carbonatée dans un sol pour A. FOURNET, enfin horizon d'accumulation de sol pour M. RAUNET.

Voilà un point important qui doit encore faire l'objet d'études dans un cadre bien précisé, qui peut être l'objet d'échange d'informations.

3. Les croûtes et encroûtements calcaires considérés dans le cadre de la sémentologie, de la géologie dynamique.

31. LES TRAVAUX DE G. CONRAD AU SAHARA ALGÉRIEN (1968).

La thèse de G. CONRAD sur l'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chech - Tanesrouft, Ahnet - Moudjir) est le résultat de dix ans de travail sur le terrain et au laboratoire.

C'est dans la deuxième partie consacrée aux sédiments et aux sols que l'auteur traite le problème de la formation des dolomies plio-quaternaires et des croûtes calcaires quaternaires. Compte-tenu que ces dernières fossilisent des surfaces d'érosion qui sont des glacis en pente douce et qu'elles s'épaississent vers l'aval, G. CONRAD admet que leur formation est due à la circulation de nappes aquatiques sur les piedmonts à pente faible. L'horizon tufacé (encroûtement de A. FOURNET) résulterait de la précipitation des carbonates au sommet du niveau phréatique, dont le profil est lié à celui des glacis. La croûte proprement dite proviendrait d'une précipitation « per descensum » des carbonates dans les horizons superficiels. C'est en se référant aux travaux d'ERHART (1956), DURAND (1959) et BOULAIN (1961) dont il ressort selon lui que la genèse des croûtes calcaires nécessite un couvert végétal assez dense, qu'il adopte cette hypothèse. La référence à J. H. DURAND nous paraît

erronée, d'après ce que nous avons vu plus haut en 22. Nous allons examiner en 4 ci-après les conceptions de J. BOULAIN.

La fraction argileuse fine l'horizon tufacé des croûtes est composé uniquement d'attapulгите que conformément aux anciennes conceptions de G. MILLOT (1964), G. CONRAD considère comme néoformée dans un milieu sous-aquatique. Les observations de terrain le conduisent à envisager, avant qu'il ait en connaissance des travaux de A. RUELLAN (voir en 4), que les tufs se formaient dans la zone d'influence d'une nappe superficielle au sein d'un profil pédologique plutôt que dans un profil « zonal » aux activités biologiques marquées.

Quant aux *croûtes zonaires* G. CONRAD pense qu'elles se sont formées au Villafranchien supérieur au Pleistocène moyen pour la plupart sous l'action de la circulation des eaux météoriques. Il s'attarde à l'hypothèse de R. COQUE (1962) qui explique leur genèse « par une circulation diffuse de solution carbonatées *sou un sol calcifère* dû à une lente accumulation éolienne à la surface et dans les fissures de son support rocheux ». Mais il ne la retient pas pour sa région tout en admettant qu'il peut y avoir de nombreux cas d'espèce.

Les croûtes zonaires qu'il a étudiées ne sont pas indépendantes du substratum: Les éléments clastiques sont les mêmes dans les croûtes zonaires et dans les roches sous-jacentes. Il pense que le calcaire de ces croûtes provient de la dissolution du carbonate des dalles par les eaux météoriques avec apport éolien négligeable qui est transporté par une eau bicarbonatée peu chargée en débris au cours d'une phase finale de ruissellement et qui s'évapore lentement.

32. LES TRAVAUX DE TH. VOGT (1974) DANS LE QUATERNAIRE SUD DE LA FRANCE.

Le colloque sur les croûtes calcaires organisé par THÈA VOGT de l'UER de Géographie de Strasbourg a été l'occasion de très fructueux échanges (actes sous presse).

Nous y avons découvert entr'autre ses intéressants travaux et ceux de P. FREYTET dont il va être question au 33.

TH. VOGT a analysé scrupuleusement les microstructures d'un sédiment périglaciaire préalablement bien localisé dans le contexte géomorphologique et bien décrit macroscopiquement. Il s'agit d'un dépôt sablo-caillouteux lité de couleur jaunâtre d'une terrasse Riss de l'Oribieu (W de Narbonne). L'action du gel y a engendré des structures typiques: galets redressés, volutes, fentes de gel. La matrice est consolidée par des veines de calcite, les niveaux caillouteux sont cimentés.

Un sol rouge du type fersiallitique s'est développé par-dessus de dépôt.

L'étude des lames minces taillées dans des échantillons du niveau fin et dans des bancs caillouteux lui a montré:

1. *Une structure* caractérisée par des réseaux de fentes millimétriques ou maille polygonale avec microcristallisation et des carbonatations dus au gel.

2. *Des sables et des graviers* peu altérés dans lesquels des calcaires et des grains de 0,7 mm définis comme des *oncolites* sont abondants. Ces grains résultent de la précipitation de la calcite entre des filaments algaire probablement d'une chorophycée d'aspect chaetoporale.

3. *Une matrice fine* = aspect d'une pâte opaque, comprenant des minces veines calcitiques des très fins grains de quartz et d'autres filaments organiques, rappelant des résidus de dégradation de structure agluaire par des microorganismes et enfin des plages de matrice fragmentée par le gel.

4. *Des revêtements* formés par de fines pellicules concentriques de calcite microcristalline avec des liserés d'oxydes de fer comparables à ceux obtenus expérimentalement dans des cycles gels-dégels (J. P. ADOLPHE, 1972) décrits par d'autres auteurs notamment (EK, PISSART 1965).

5. *Des agrégats* de gros cristaux hexagonaux, de calcite limpide, dans des vides qui pourraient correspondre à des calcitans et qui résulteraient de la précipitation du calcaire issu de la décarbonatation du sol rouge superficiel.

L'auteur en conclut que l'enrichissement d'un dépôt peut avoir plusieurs origines:

1. Biologique (algues).
2. Cryogénique (revêtements calcitiques).
3. Diagénique (recristallisations).
4. Pédologique (calcitans).

Compte tenu du volume de calcaire précipité dans le sédiment il considère que l'encroûtement est surtout d'origine cryogénique.

33. LES TRAVAUX DE SÉDIMENTOLOGIE DE P. FREYTET (1964-65) DANS LES BASSINS CONTINENTAUX DU CRÉTACÉ ET DU TERTIAIRE EN FRANCE.

I. *L'analyse des milieux de dépôt carbonatés.*

Depuis une dizaine d'années ce chercheur étudie le problème des carbonates des milieux fluvio-lacustres d'abord par des méthodes géologiques classiques (stratigraphie, technique, sédimentologie), puis en y recherchant les aspects paléo-pédologiques.

C'est ainsi qu'il en est arrivé à définir des cyclothèmes *sédimentopédogénétique* et à bien définir les milieux de dépôts dans le crétacé supérieur et le tertiaire de certains bassins français:

1° *Chenal:*

avec conglomérat, gris à stratification oblique, algues cyanophycées, unios, parfois croûte ferrugineuse, racines.

2° *Plaine d'inondation à paleosols:*

argile, argile sableuse à sablolimoneuse marne, marne-sableuse, rouge, grise ou marmorisée, parfois à nodules calcaires ou ferrugineux.

3° *Marécage de bordure de lac carbonaté:*

calcaires noduleux, bréchique (dessiccation), traces de racines, marmorisations, croûtes zonaires.

4° *Lac plus ou moins profond:*

calcaire à Linnées et Planorbes, calcaire graveleux, brèche polygénique, laminites.

La pédogenèse peut s'installer sur n'importe quel substrat. Les traces des racines en sont le témoignage. Les modifications pédologiques résultent de l'action d'une nappe oscillante. *Ces sols sont de type alluvial hydromorphe plus ou moins riche en calcaire (figure 3).*

II. *Les types de carbonate:*A. *Les carbonates de la plaine d'inondation fluviale.*

Ce sont des amas calcaires du type noduleux, rarement des septarias de forme isodiamétrique, cylindrique (manchons radiculaires) associés aux marnes marmorisées. *Les nodules sont micritiques au microscope (cristaux de 3 à 5 μ), juxtaposés à des cristallaria de fissures de rétraction.*

B. *Calcaires palustres.*

Un sédiment carbonaté d'eau profonde ou de marécage peut être émergé et subir la dessiccation et la pédogenèse. Il en résulte:

- des traces des passages de racine.
- des fentes de dessiccation verticales ou ramifiées avec bréchification intense.
- des nodulisations avec ou sans ségrégation de la matière argileuse.
- d'autres phénomènes tels que remaniement d'animaux, migration du fer (marmorisation) néoformation d'argile (montmorillonite, attapulгите) ou de gyps....

C. *Les croûtes zonaires.*

Sous ce terme P. FREYTET désigne une roche indurée présentant une lamination très fine, alternativement claire et sombre *d'origine très variée*. C'est pourquoi, pour lui, elles constituent un problème. Il faut les distinguer des *stromatolites*, formations de surface à *algues cyanophycées*, avec lesquelles il les avait confondues dans le calcaire de Beauce (Oligocène).

En conclusion de ses travaux P. FREYTET insiste sur l'importance des phénomènes actuels pour interpréter l'ancien et réciproquement sur l'intérêt de chercher des modèles reconstitués par observation de l'ancien, dans la nature actuelle.

34. CONCLUSIONS - SYNTHÈSE.

Les auteurs des travaux à orientation géologique, sédimentologique ont bien mis en évidence la complexité et la succession des mécanismes qui interviennent dans la mise en place des encroûtements calcaires:

- une sédimentation calcique originelle.
- des précipitations, des remaniements d'origine biologique.
- des activités physico-chimiques (fente de retrait, de dessiccation, d'action périglaciaire).
- une surimposition de la pédogenèse plus ou moins marquée selon les milieux mais non responsable de *la plus grosse masse* de l'accumulation.

La pédogenèse réorganise, retouche après mise en place. Ces travaux sont très intéressants car ils montrent bien la position à mi-chemin des croûtes et encroûtements calcaires, qui justifie selon nous des études pluri disciplinaires.

En outre ils se situent tout à fait dans la ligne des concepts énoncés par G. GAUCHER (op. cit.) et J. H. DURAND (op. cit.) et les illustrent sur certains points.

Comme P. FREYTET ces auteurs avaient saisi l'importance de reconstituer des modèles « sédimento-pédogénétiques » mais à travers le Quaternaire d'Afrique du Nord. C'est là une démarche à retenir.

4. Classification et genèse des croûtes et encroûtements calcaires envisagées dans le cadre du développement du profil des sols méditerranéens.

41. LES TRAVAUX DE J. BOULAIN EN ALGÉRIE (1957-1961).

I. *Le fond d'observation - les concepts:*

Dans sa thèse publiée en 1957, J. BOULAIN a rassemblé les résultats de ses importantes études cartographiques réalisées dans la vallée du Chélif. Il a effectué ses levés en utilisant la méthode géologique et morphologique pour relier les sols aux niveaux géologiques et morphologiques mais nous semble-t-il, dans un esprit plus physiographique (aspect statique) que géomorphologique (aspect dynamique).

Dans la partie de son étude consacrée aux croûtes il déclare admettre leur ancienneté, se qui est en conformité avec la partie cartographique de son travail où il les considère comme les roches mères de certains types de sol (Rendzine; Sols bruns sur carapaces calcaires). Cependant, il estime qu'aux

théories de « type géologique » de certains de ses prédécessures (G. GAUCHER, J. H. DURAND) il faut ajouter une théorie pédologique qui lui paraît ressortir des travaux et des idées énoncées par certains auteurs: M. AVELLANO (1953), M. SCHOELLER, M. SACCARDY, DALLONI 1951, et G. AUBERT (cours I.D.E.R.T.). Il croit devoir « faire jouer les ressources d'une jeune science pour lever les indéterminations «des théories anciennes» un peu trop simplistes pour expliquer un phénomène aussi controversé que la carapace calcaire ».

II. *Nomenclature et morphologie des diverses formes d'accumulation:*

Dans sa thèse J. BOULAINÉ (1957) propose une nomenclature, dans laquelle il utilise des noms arabes dont la valeur régionale est certainement très intéressante, afin d'éviter la confusion. Ce sont de haut en bas:

1. « *Trab* »: l'ensemble des horizon terreux du sol par-dessus la carapace lorsqu'il n'a pas été érodé.

2. « *Tifkert* »: partie dure et solide de la carapace dont les pierres sont extraites pour la construction. (Tifkert zonaire à calcaire pur, rose saumon, Tifkert rubané, Tifkert homogène dur..., *Tifkert en rognons par destruction en surface*).

3. « *Tafezza* »: Formations calcaires tendres, friables, homogènes ou nodulaire (Tafezza homogène, nodulaire, feuilleté, stalagmitique).

Dans sa publication de 1961 il distingue:

1. Les carapaces calcaires des encroûtements liés à des nappes phréatiques actuelles ou fossiles.

2. Les carapaces calcaires steppiques.

Il s'attarde sur leur premières qui présentent de haut en bas:

— un horizon terreux (TRAB).

— des horizons calcaires solides mais imparfaitement lapidifiés (tafezza homogène).

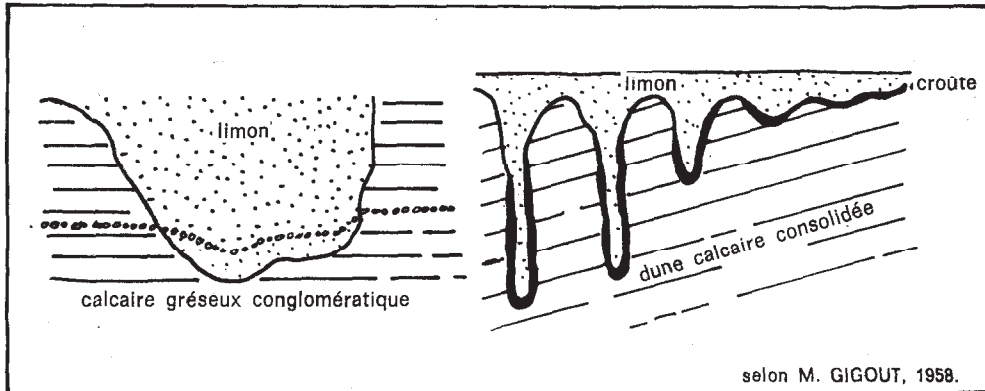
— des nodules et poupées allongés selon la verticale (tafezza nodulaire).

III. *Les observations favorables à l'origine pédologique.*

Voici les principales observations qui ont conduit J. BOULAINÉ (1961) à considérer que les croûtes (type 1 ci-dessus) sont les produits de la pédogenèse:

a) Dans les sols alluviaux récents du Chélif, des nodules calcaires se forment autour d'anciennes racines et dans les pores du Sol. Les racines de pins plantés, âgés de 75 ans sont épigénisées par du calcaire pur.

b) Des horizons d'accumulation de calcaire friable, homogène, non consolidé apparaissent sous des horizons décalcifiés en surface et par dessus des



Formation du limon rouge « in-situ » par lessivage du calcaire accumulé en crouëte zônaire dans les lapiez.

Figure 1.

horizons profonds à nodules, sans qu'il n'y ait de rupture de continuité, des traces de ravinement etc....

c) Des horizons superficiel de sols rouges formés sur alluvions anciennes décalcifiées, présentent un squelette siliceux alors que les horizons profond présentent plus de 30% d'éléments calcaires sans qu'il soit possible de prouver que l'alluvionnement a varié.

d) Des horizons calcaro-gypseux se retrouvent dans des sols développés sur des dunes dans lesquelles, il n'y a pas de nappe ou des écoulements en nappe.

e) Les sols à carapace calcaire se situent dans le domaine des forêts méditerranéennes entre 650 mm et 350 mm, soit plus ou moins dans l'étage semi-aride de L. EMBERGER). Vers l'aride, ils cèdent la place aux sols bruns steppiques à carapace steppique d'origine plus complexe selon J. BOULAINÉ.

f) les carapaces calcaires méditerranéennes recouvrent des surfaces à morphologie évoluée: collines, terrasses, fragments de glacis d'accumulation anciens.

Ces observations ont suggéré à J. BOULAINÉ que les racines des végétaux jouent un rôle fondamental dans l'accumulation du calcaire. Celle-ci se produisait en période de biostasie dans un horizon homogène subsuperficiel à haute teneur en calcaire zone d'action du chevelu radiculaire.

En profondeur le calcaire se précipiterait sous forme de nodules à l'emplacement des grosses racines.

42. LES TRAVAUX DE M. GIGOUT AU MAROC.

I. Observations.

Au Maroc, M. GIGOUT observe des *limons rouges* s'insinuant en poche dans des calcaires gréseux dont il constitue le résidu de dissolution (fig. 1).

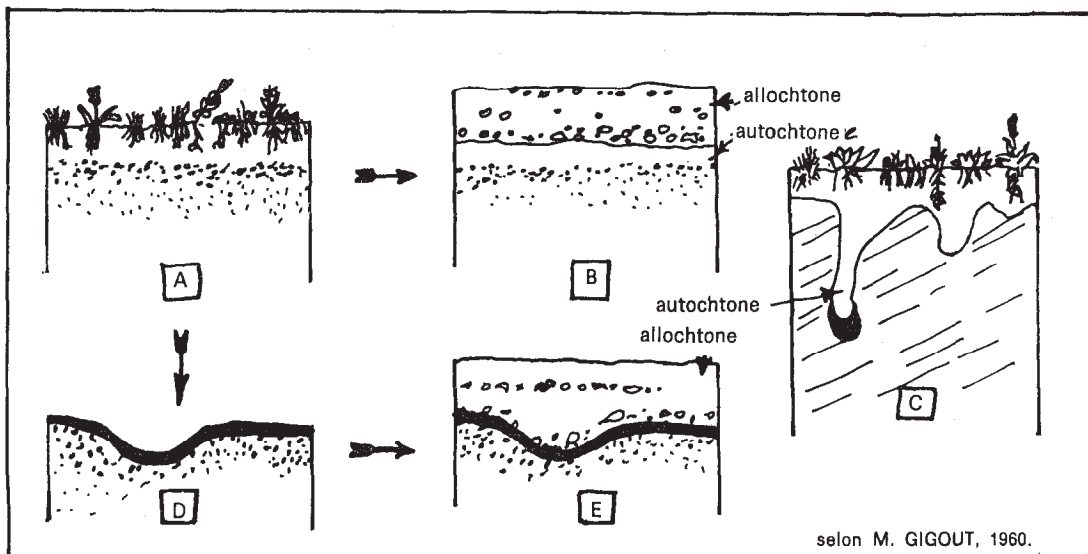
Entre le grès et le limon, il remarque localement la présence d'une croûte de *texture zonaire*. Dans le limon, il relève une ligne de cailloux dont il constate l'affaissement par rapport à la position horizontale qu'elle occupe dans la roche-mère gréseuse encaissante.

II. Une première interprétation génétique.

Pour lui, les faits précités sont la preuve que le limon rouge provient bien du lessivage du calcaire impur. Il le qualifie de « limon autochtone ».

De plus, étant donné que ces poches n'ont jamais pu se vider, il conclut que *la croûte est l'horizon d'accumulation de l'horizon supérieur, lessivé, constitué par le limon*. Pour suivre son interprétation, il lui donne une portée plus générale en déclarant que la croûte associée au limon autochtone n'a pu naître que pendant ou après la genèse de ce dernier.

M. GIGOUT pense que le limon rouge se serait formé durant une période humide alors que *la mise en place de la croûte aurait plutôt nécessité des saisons sèches et humides bien tranchées*.



- A - Phase pédogénétique: lessivage du « limon sol » (1) rubefié; accumulation de calcaire pulvéulent (2), provenant aussi de la roche: « L'abiod ».
- B - Même phase sans durcissement de l'accumulation calcaire, enfoncement de l'autochtone par apport latéral.
- C - Cas particulier: formation de la croûte d'origine interne sur grès calcaire dur par lessivage: « limon sol » superficiel.
- D-E - Phase sédimentaire: durcissement soit par recristallisation de l'« abiod » par circulation d'eau souterraines, soit par ruissellement superficiel: l'« abiod » dénudés est dissous et recristallisé par les pluies.

Figure 2.

III. Une seconde interprétation génétique.

En 1960, après la lecture des travaux de BOULAINÉ (1957) en Algérie, il apporte de nouvelles précisions à ses hypothèses.

Il décompose la genèse des croûtes en deux phases successives, rarement simultanées, correspondant à l'activité de certains processus:

1. Une première phase pédologique d'enrichissement en calcaire dans un horizon interne de sol provenant d'un « limon sol » supérieur, lessivé, rubéfié, décalcifié, engendrant l'accumulation de calcaire pulvérulent (A, profil normal; B, profil remanié en surface, fig. 2).

Celle-ci pourrait cependant provenir aussi de la roche substratum et d'apports latéraux (calcaire pulvérulent d'origine lacustre de J. H. DURAND).

Cette phase voit aussi se former la pellicule de croûte zonaire dont il a été question ci-dessus et qu'il appelle désormais: *croûte d'origines internes* (C, figure 2).

2. Une seconde phase sédimentaire de durcissement par diagenèse interne par circulation d'eaux souterraines au sommet du calcaire pulvérulent ou par ruissellement superficiel (A et E, figure 2).

Dans les deux cas, il se produit une *recristallisation de la partie supérieure du calcaire pulvérulent*, qui peut aussi se retrouver sur certains affleurement rocheux, qu'il qualifie comme J. H. DURAND de *patine*.

43. LES CONCEPTIONS DE G. BEAUDET (1969).

Dans son étude du Plateau central marocain et de ses bordures G. BEAUDET aborde le problème des sols à croûte calcaire surtout situés dans l'étage semi-aride dans la plaine du Saïs au NE et dans le pays Zaer à l'W.

Il réfute l'hypothèse du ruissellement superficiel en arguant de ce que si on admet l'action de ce processus, les horizons meubles supérieurs liés habituellement à la croûte, doivent être obligatoirement interprétés comme des alluvions ou colluvions. Or, la mise en place de celle-ci nécessite un remaniement ou un ravinement des feuillets superficiels qu'il n'a pas constaté.

Pour étayer son argumentation, il se réfère à des coupes étudiées dans le pays Zaer, qui montrent que l'accumulation calcaire s'est faite dans des dépôts homogènes, lithologiquement (nature des cailloux) et minéralogiquement (nature des argiles).

C'est sur la base de cette constatation, qu'il considère que l'horizon supérieur brun rouge, la croûte et l'encroûtement appartiennent à un même profil; l'accumulation du calcaire s'étant produite dans les horizons moyens et inférieur d'un sol.

Il admet toutefois que le calcaire n'a pas seulement migré verticalement mais qu'il est venu également par *apport latéral, subsuperficiel*, avec une

nappe phréatique temporaire transistant et déposant mis en solution en amont. Il y voit pour preuves les traces d'hydromorphie dans la partie inférieure du profil (taches jaunâtres et rouilles).

Cependant en discutant l'analyse d'un profil de la plaine du Saïs, il souligne qu'il y a surimposition d'un sol rendziniforme sur un ancien sol encroûté: *il en conclut que la croûte est une formation ancienne puisqu'un sol sur croûte s'est développé sur un sol à croûte*. C'est là une observation que nous considérons comme fondamentale.

G. BEAUDET a également bien situé les croûtes et encroûtements dans le paysage, en particulier dans le bassin de l'Oued Beth à la hauteur de Souk el-Arba.

il constate:

1. que les quatre niveaux post-Villafranchiens, les plus anciens sont encroûtés (du Regréguien au Tensiftien inclus); le Soltanien et le Rharbien ne l'étant pas.

2. que le Regréguien présente l'accumulation calcaire la plus épaisse avec les indurations noirâtre.

A l'issu de son analyse des faits G. BEAUDET propose *la succession des phases suivantes dans la genèse des encroûtements et des croûtes*:

a) *dépôt des formations.*

b) *évolution pédologique et accumulation du calcaire lors d'une période humide entretenant une couverture végétale dense.*

c) *assèchement climatique entraînant, le durcissement superficiel de l'accumulation calcaire précédemment constituée.*

Le grand mérite de G. BEAUDET est d'avoir proposé un schéma d'évolution très explicite et clair. On retrouve en b. une conception identique à celle de J. BOULAIN.

44. LES TRAVAUX DE A. RUELLAN AU MAROC (1970).

I. *Circonstances.*

Après une dizaine d'années d'études essentiellement consacrées aux sols de la Basse Moulouya, A. RUELLAN a présenté le fruit de ses observations et de ses réflexions dans une thèse consacrée aux sols à accumulation calcaire (1970-1971).

Le terrain d'étude de A. RUELLAN se situe dans la Basse Moulouya (Maroc oriental) sur le front nord des Beni Snassen.

II. Une classification des formations calcaires essentiellement morphologiques.

La classification de A. RUELLAN constitue surtout une mise en forme des éléments que nous venons de passer en revue ci-dessus en examinant les divers travaux effectués au Maroc et en Algérie.

Les accumulations calcaires y sont classées en fonction de leur dureté, de leur teneur en calcaire et leur structure (stratifiée ou non).

Sur cette base, A. RUELLAN a introduit quelques subdivisions supplémentaires au niveau des croûtes.

En voici l'essentiel:

1° Les distributions diffuses du calcaire.

La couleur du dépôt est bien apparente, très fines particules inférieures à 1 mm difficilement ou non visibles à l'œil nu. Les grains fins de calcaire appartiennent au plasma (S-matrix de Brewer).

2° Les concentrations discontinues.

La couleur du dépôt s'estompe.

21. *pseudo-mycéliums*: défini ci-dessus selon DURAND.

22. *amas friables*: nodules farineux de DURAND, taches calcaires de WILBERT.

23. *nodule*: granules (volume inférieur à 1 cm), rognons (5 cm de diamètre, 10 cm de long); nodules concrétionnés de DURAND; la définition des nodules est identique à celle de WILBERT, mais ce dernier ne les considère qu'en bloc dans son *encroûtement nodulaire*.

3° Les concentrations continues.

La couleur initiale du dépôt ou du sol disparaît.

31. *encroûtements*:

— *encroûtements massifs d'aspect crayeux* ou tuffeux (croûte tuffeuse ou encroûtement crayeux de WILBERT, formation pulvérulente de DURAND, *taffezza* de Boulaine).

— *encroûtements nodulaires*: mêmes nomenclature et définition que WILBERT.

32. *encroûtements feuilletés*:

— *les croûtes*: superposition de feuillets d'encroûtement durci, mais non pétrifié avec des teneurs en calcaire de 60 à 80%. Cette définition correspond en partie à celle de la croûte tuffeuse de WILBERT, *tifkert* et *taffezza* de Boulaine.

— *dalles compactes*: constituées par un ou plusieurs feuillets de calcaire très dur, de couleur souvent saumon, de 10 à 20 cm d'épaisseur, très pétrifiés.

La teneur en CaCO_3 est supérieure à 80%.

A notre avis, les conglomérats de WILBERT devraient se rattacher à ce type de même qu'une partie des croûtes zonaires ou lamellaires qui sont communes à cet auteur et à DURAND et le Tifkert de BOULAINÉ.

— *encroûtement lamellaire ou pelliculaire rubanée*: formation très dure et très calcaire dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres, présentant une série de lamelles très fines, parallèles entre elles ou se recoupant, de couleur blanche ou saumon. Les cailloux en sont absents.

Elle est incluse dans la croûte zonaire ou lamellaire de DURAND et WILBERT dont elle devrait constituer le sommet. C'est elle que M. GIGOUT (op. cit.) a retrouvée semble-t-il dans les poches de dissolution des dunes littorales. Elle correspondait aux pâtes de DURAND, ou tifkert rubané et zonaire de BOULAINÉ.

III. Les formations calcaires considérées comme horizon d'accumulation dans les profils pédologiques caractéristiques des sols isohumiques.

1° La définition des horizons du profil calcaire.

A. RUELLAN considère ces diverses formes d'accumulations calcaires, comme des horizons BCa, sans que cette dénomination n'implique un certain type de mécanisme ou l'accumulation au même niveau d'autres éléments.

L'horizon BCa est surmonté par un horizon où le calcaire est moins abondant ou absent, qu'il qualifie d'ACa.

Au-dessous de l'horizon BCa, c'est l'horizon C au niveau du matériau originel où le calcaire est toujours présent en quantité moindre et souvent bien individualisé.

2° Les divers types de profils calcaires.

D'après A. RUELLAN ces divers types d'accumulation ou l'horizon BCa déterminent les profils calcaires caractéristiques des sols isohumiques.

Tels sont les profils:

Non différenciés s'ils sont uniformément calcaires ou

Peu différenciés s'il existe une accumulation diffuse dont il est difficile de fixer les limites.

Moyennement différenciés lorsque l'accumulation se marque par des nodules et des amas bien individualisés.

Très différenciés lorsqu'un encroûtement plus ou moins développé est présent.

3° Les modes de gisement des différentes formes d'accumulation du calcaire.

a) Le passage de l'horizon Aca à l'horizon Bca est de plus en plus net et tranché en passant des accumulations diffuses aux encroûtements. Par contre le passage de l'horizon Bca à l'horizon C est progressif.

b) Il n'y a aucun rapport entre la richesse en calcium ou calcaire du matériaux originels et la puissance des accumulations qui d'ailleurs se trouve dans des matériaux non calcaires. Dans ce cas le bassin versant doit être calcaire en amont.

c) La texture du matériel parental a de l'influence sur le faciès de l'accumulation.

d) Les diverses formes d'accumulation sont associées étroitement verticalement et latéralement et certains peuvent coexister dans un même horizon, (distribution diffuse, amas, nodules). En outre, elles dérivent les unes des autres (encroûtement non feuilleté dérivant des horizons à concentrations discontinues, dalle dérivant des croûtes etc...).

e) Dans les sols à profils moyennement différenciés et très différenciés, l'horizon Bca peut être simple, double et même triple, l'accumulation la plus puissante étant toujours la plus profonde.

IV. *Quelques propriétés physiques et morphologiques des sols à profil calcaire.*

1° *Le profil textural.*

Est un aspect morphologique jugé important par A. RUELLAN, car bien visible et mesurable par les analyses de laboratoire.

Cependant deux ensembles de caractères lui paraissent difficiles à distinguer:

- a) ceux que l'on peut attribuer aux matériaux originels.
- b) ceux qui résultent de la pédogenèse.

C'est pourquoi il considère séparément les éléments grossiers et la fraction argileuse (non calcaire).

Sur la base de l'étude des variations verticales de la texture de la terre fine (0-2000 mm) que selon nous il qualifie à tort de globale, il aboutit aux conclusions suivantes:

a) Les matériaux alluviaux sont hétérogènes dans les plaines de la basse Mouloya, que ce soit verticalement ou latéralement. Ils se surimposent, s'emboîtent, les uns dans les autres et ont pu tranquer des sols (il pense toutefois que ce point n'est pas prouvé par ses analyses).

b) L'homogénéité verticale des courbes granulométriques des horizons Aca et Bca, la disposition des cailloutis lui fournissent, des arguments, qu'il juge cependant non décisifs en faveur de *l'origine pédogénétique de ces horizons.*

c) L'analyse de la répartition de l'argile dans les profils le pousse à distinguer des horizons texturaux At et Bt selon que l'enrichissement en

argile se manifeste très près de la surface ou en profondeur au contact de l'horizon Bca. Il trouve des arguments supplémentaires dans les études micromorphologiques de N. FEDOROFF. Celles-ci ont montré en effet des pellicules d'argile orientées autour des grains de sable et dans la masse du plasma, dont l'importance relative augmente en profondeur puis diminue quand le calcaire apparaît, dans le Bca.

La nomenclature utilisée par A. RUELLAN pour désigner les horizons des sols à profils calcaires en fonction de la texture nous semble assez théorique:

Aca: se subdivise en deux niveaux texturaux At et Bt.

Bca: se subdivise en deux niveaux texturaux difficiles à séparer Bt et Ct.

C: matériau originel.

2° *La couleur.*

Est plus rouge (2,5 YR) dans les sols peu calcaires et plus argileux. On note un éclaircissement de la surface (matière organique) vers la profondeur (calcaire).

3° *La structure.*

Est polyédrique muciforme dans les Aca, At et devient polyédrique angulaire dans les horizons Bt.

V. *Quelques propriétés chimiques des sols à profil calcaire.*

1° *La matière organique.*

Se répartit selon un profil qui est en relation avec le profil calcaire avec la couleur de l'horizon At.

Les teneurs en matière organique se répartissent généralement de façon isohumique; c'est-à-dire en décroissant faiblement en profondeur. La décroissance est plus rapide si la couleur de l'At est claire et si les teneurs en calcaire de l'At et du Bt sont plus fortes.

Parallèlement les taux d'humification diminuent tandis que les proportions d'acides fulviques et d'acides humiques bruns augmentent par rapport aux gris.

2° *Le fer.*

Les teneurs en fer libre et les rapports fer libre sur fer total sont plus élevés (rapports 0,5-0,7) dans les sols rouges (2,5 YR) que dans les sols brun-rouges (5 YR) calcaires dès la surface (rapports 0,4-0,5).

Cette différence se marque dans les horizons At comme dans les horizons Bt, généralement plus argileux. Ces teneurs semblent varier parallèlement avec les teneurs en argile sans que ce soit une règle absolue.

selon P. FREYTET, 1975.

MILIEUX DE SEDIMENTATION. DOMAINE FLUVIO-LACUSTRE.

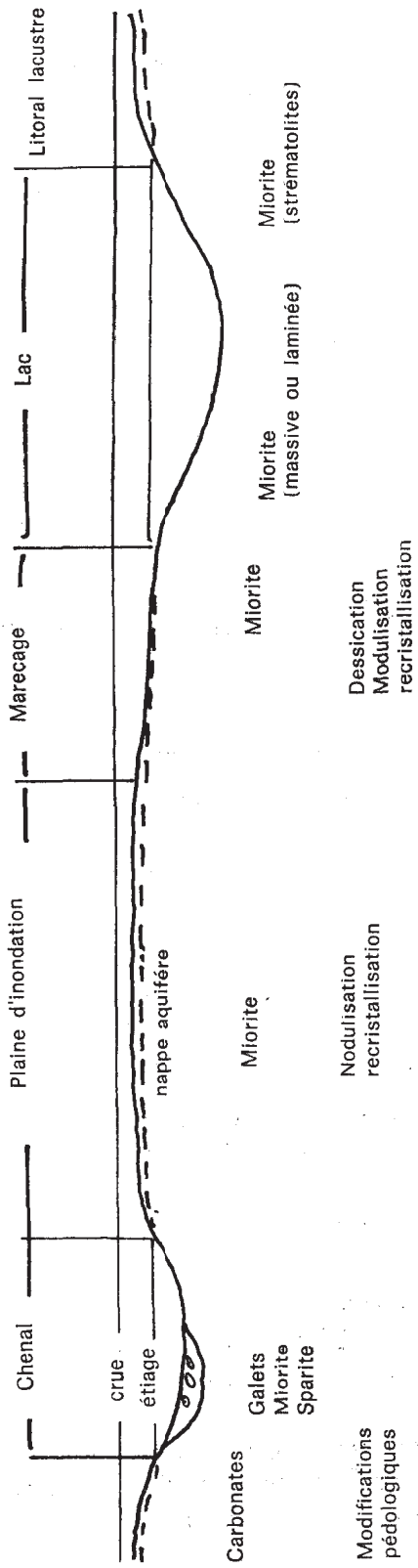


Figure 3.

En lame mince, le plasma des At ou Bt des sols non calcaires apparaît imprégné de « peinture rouge » de petits agrégats et concrétions ferrugineuses et les cutans sont souvent des ferriargilans.

VI. *Les types d'argile et leur répartition.*

1° *L'illite.*

Est la plus fréquente. Elle est bien cristallisée dans les horizons Aca très calcaires et très clairs. Elle est altérée et ouverte dans les Aca non calcaire et At sombre. Le « baillement » des interfoliaires est réduit dans les horizons Bca et C.

2° *La vermiculite.*

Est absente. La montmorillonite est rare.

3° *La chlorite.*

Est toujours présente (10 à 20%). Elle est cristallisée dans les encroûtements et s'altère parallèlement à l'illite.

4° *La kaolinite.*

Est très peu représentée et semble héritée.

5° *L'attapulgite constitue l'originalité minéralogique des sols à profil calcaire de la basse Moulouya.*

Elle est absente des horizons non calcaires et apparaît d'autant plus abondamment et superficiellement dans les sols que les horizons Bca sont plus développés et proches de la surface que les horizons At sont plus calcaires et plus clairs.

Sa proportion ne dépasse jamais 50% des minéraux argileux. Elle est plus faible dans les encroûtements surmonté par un At sombre, dans les dalles compactes et croûtes lamellaires.

C'est dans les encroûtements non feuilletés et dans les croûtes tendres qu'elle est la plus élevée (près de 100%). Elle diminue sous les encroûtements.

VII. *L'influence des facteurs pédologiques intéressant la genèse des sols à profil calcaire.*

1° *L'influence du climat actuel.*

Le climat manifeste différemment son action d'une région à l'autre (influence de la proximité ou de l'éloignement de la mer, déterminant l'étage aride et semi-aride).

Les horizons Aca-At sont en général plus décalcifiés, plus argileux, plus colorés (rouge) et plus sombres dans le semi-aride que dans l'aride. Le facteur roche-mère peut toutefois intervenir pour troubler ce schéma.

2° *L'influence du modèle général résultant de l'histoire du Quaternaire.*

A. RUELLAN admet qu'un niveau classé selon la nomenclature classique du Quaternaire s'est façonné à un âge d'autant plus éloigné qu'il est plus élevé et qu'il en est même pour le développement des sols.

Il constate ainsi que :

- a) *L'accumulation du calcaire s'accroît avec l'âge des niveaux.*
- b) *L'accumulation du calcaire ne s'accompagne pas d'un appauvrissement, corrélatif des horizons Aca.*
- c) *Le profil textural argileux se différencie à partir du Rharbien ancien, en remontant vers les niveaux plus âgés; il est maximum sur les terrasses du Soltanien ancien.*
- d) *Le profil organique, la couleur des horizons de surface et leur structure apparaît au Rharbien ancien. et ne se modifie pas sur les autres niveaux plus anciens.*
- e) *L'attapulгите se développe nettement en fonction de l'âge des surfaces.*
- f) *Le profil structural, la rubéfaction des horizons B, la salure et l'alcalinisation des horizons B et C se marquent bien à partir du Soltanien dans le semi-aride.*

3° *L'influence du microrelief.*

Sur un même niveau, terrasse ou glacis, l'horizon Bca peut changer de faciès selon les variations du microrelief.

L'accumulation est maximum sur les bords du glacis ou de la terrasse, elle est minimum au centre. Pour expliquer ces variations A. RUELLAN fait appel à des axes de circulation préférentielle de l'eau et à des phénomènes de reprise d'érosion, provoquant un rajeunissement des formes d'accumulation.

Une même surface peut donc porter des sols dont les différenciations sont diverses.

VIII. *Les processus de migration latérale, responsable de la genèse des sols à profil calcaire différencié.*

D'après A. RUELLAN, ces processus établissent au sein d'un bassin versant des relations étroites entre l'amont et l'aval, entre les matériaux, les mécanismes et les sols, ce qui a comme conséquence de transformer la notion de roche-mère.

1° *La migration des matériaux.*

La mise en place des alluvions et colluvions s'est faite rapidement au cours de plusieurs périodes du Quaternaire. Ces matériaux proviennent surtout de l'érosion de sols édifiés en amont (sols rouges essentiellement).

Des remaniements se produisent pendant la différenciation des sols:

- a) en surface par érosion.
- b) en profondeur sous la forme de mouvements particuliers ou de masse.

A. RUELLAN considère ces mécanismes comme des processus actifs de la formation des sols car ils créent localement entre les horizons pédologiques de « fausses discontinuités lithologiques » petits cailloux lenticulaires, limites nettes souvent qualifiées de « ravinantes ».

Ces mécanismes agissant aussi sur le façonnement du relief, A. RUELLAN, en conclut qu'il y a interdépendance étroite entre pédogenèse et morphogenèse.

Les remaniements ont été accélérés par l'érosion anthropique avec comme conséquence la mise en place des formations classiquement attribuées au Rharbien.

2° La migration des particules fines.

Les particules fines migrent dans les horizons superficiels, sous forme dispersée ou en suspension, d'autant mieux que les matériaux sont moins calcaires.

Ces migrations sont à l'origine de l'horizon At, appauvri en éléments fins, qui s'accumulent peu dans les sols.

L'horizon Bt est le résultat de l'altération in situ, qui entraîne la néoformation de minéraux argileux.

3° La migration des ions.

Le processus et son mode d'action.

Les ions migrent en solution, sur, dans et sous les sols.

Les distances et les profondeurs atteintes dépendent de l'importance relative prise par les mouvements verticaux par rapport aux mouvements obliques. Ceux-ci dépendent de l'humidité du climat ou du pédoclimat et de la perméabilité.

En climat aride les migrations sont donc moins profondes qu'en climat humide.

Le calcaire se concentre et s'accumule de façon discontinus en profondeur, dans les horizons C (roches altérées ou matériaux transportés).

Les ions s'accumulent dans les zones d'aval, où ils dégradent les minéraux argileux. Le confinement qui résulte de l'aridité à la néoformation d'attapulgite.

La genèse des horizons.

Deux types d'horizons apparaissent dans les sols: des horizons appauvris et des horizons d'accumulation.

La profondeur de la limite entre l'horizon appauvri et l'horizon d'accumulation est diffuse en général. Elle dépend de la solubilité des sels, par conséquent elle est d'autant plus superficielle que le climat est aride.

Le calcaire d'origine latérale s'accumule et se concentre autour de la partie moyenne et inférieure du système racinaire puissant des forêts et des matorrals, en dehors des zones humides et subhumides où les carbonates sont éliminés profondément (paysage karstique, roches perméables, cfr. J. BOULAINÉ).

L'horizon Bca résultant se développe très lentement, ses faciès les plus puissants ont nécessité toute la durée du Quaternaire pour se former:

— L'accumulation est d'abord à distribution diffuse puis succèdent pseudomycéliums, amas friables et encroûtement. Ceux-ci se durcissent, se feuilletent en croûte et se pétrifient en dalles compactes.

— La pellicule rubanée (croûte zonaire) se développe enfin sur des surfaces dures et imperméables par ruissellement sub-superficiel.

L'action de ces processus suppose un régime hydrique contrasté (eaux suffisantes, circulation rapide)).

La profondeur d'accumulation est celle à laquelle la concentration des solutions par évaporation n'est plus compensée par l'action du CO₂ biologique.

— La décarbonatation de Aca n'accompagne pas la différenciation du Bca.

Son appauvrissement en CaCO₃ est contrarié. Il a tendance à s'amincir et se recalcariser quand la partie du Bca remonte puis à s'appauvrir par remaniement, par lente érosion aux dépens du Bca.

Il contient une teneur minimum en CaCO₃ et atteint une épaisseur variable avec les climats (mince si aride, épais si humide).

45. CONCLUSION - SYNTHÈSE.

Les auteurs des divers travaux que nous venons d'examiner se montrent donc plus soucieux d'expliquer la place ou la genèse des croûtes dans le cadre du profil pédologique.

1. M. GIGOUT considère que la croûte zonaire qui couvre les grès du Maroc provient du lessivage du calcaire du limon rouge superficiel qui la couvre et d'un enrichissement à partir de la roche-mère.

Celui-ci se serait produit durant une période humide du Quaternaire récent. Le durcissement de la croûte se serait fait par diagenèse interne par circulation d'eau en profondeur ou en surface.

Cette interprétation qui ne résulte que d'une observation très localisée, retient cependant notre attention.

2. J. BOULAINE fait encore plus nettement appel à des processus pédogénétiques pour expliquer la genèse des carapaces calcaires non steppiques (selon sa terminologie). Ses arguments sont surtout tirés de ce qu'on pourrait qualifier de principe des causes actuelles.

En effet cet auteur explique surtout l'enrichissement en calcaire par l'action radiculaire de la végétation forestière en climat semi-aride, sur la base de ses observations sur l'accumulation du calcaire dans les pores radiculaires des sols alluviaux récents de la plaine du Chélif.

Pour pouvoir juger réellement du bien fondé des hypothèses de J. BOULAINE nous aurions souhaité plus de précisions de sa part dans la localisation des croûtes et encroûtements dans le paysage. Sinon, détachées de leur contexte réel, ces démonstrations restent trop théoriques.

Chez J. BOULAINE nous pensons qu'il existe une discordance entre les observations et les théories présentées. Cet auteur paraît accorder trop d'importance à certains détails (réels tels que la présence de racine) et ne plus tenir suffisamment compte des conditions générales de gisement des croûtes et encroûtements dans le modèle générale (glacis, terrasses, anciens lacs intérieurs où le calcaire a pu être précipité dans les sédiments, avant ou pendant la colonisation végétale de milieu hydromorphe, voir travaux de P. FREYET et G. CONRAD en 3).

3. Les conclusions du travail le plus récent, celui de A. RUELLAN ne nous satisfont pas d'avantage sur le plan de la stricte caractérisation de l'action des processus dits pédogénétiques dans la genèse des croûtes.

L'activité des processus identifiés par cet auteur nous paraît schématisée car présentée trop théoriquement détachée du cadre temporo-spatial fourni par l'étude soigneuse du modelé dans lequel les faits sont observés.

Entre A. RUELLAN et nous, il y a un obstacle au niveau de la conception de base que nous avons cru déceler à travers la terminologie utilisée, par cet auteur pour désigner les horizons et définir les processus pédogénétiques.

A. RUELLAN, selon les conceptions et les définitions que nous avons adoptées (voir J. TRICART, 1965), rassemble sous le terme de pédogenèse, des processus que nous considérons comme morphogénétiques: notamment mouvements latéraux des matériaux, sédimentation, ruissellement, etc....

L'adoption du sigle Bca pour désigner toutes les formations calcaires nous paraît spécialement délicate. Elle laisse entendre qu'il existe une relation entre les horizons appauvris de surface et cet horizon d'accumulation, du moins si on accorde une signification génétique aux sigles et non une signification écologique. Or il nous semble que c'est précisément le cas de A. RUELLAN.

Les autres sigles utilisés par cet auteur pour désigner les horizons qui surmontent les accumulations continues du type croûte (Aca, At, Bt) nous paraissent complexes et même confuses.

Ils nous paraissent essentiellement justifiés par le souci qu'a ce chercheur d'établir une relation entre les horizons de surface et de profondeur qu'il considère comme appartenant à un même profil « monogénique »: *le sol à profil calcaire différencié.*

La classification morphologique de A. RUELLAN, la plus récente, nous a paru satisfaisante. Elle est déjà le fruit d'une concertation de cet auteur avec d'autres pédologues (notamment S. HENIN et G. BOCQUIER). Elle a le mérite de regrouper selon une ordonnance systématique, presque taxonomique, les différentes formes d'accumulation du calcaire et de permettre le rattachement des nomenclatures utilisées dans les travaux antérieurs.

Nous n'avons pas éprouvé de difficultés pour l'adapter à nos propres observations bien que nous ayons utilisé au départ ⁽¹⁾ une nomenclature plus proche de celle de J. WIJBERT et J. H. DURAND.

Nous déplorons cependant qu'elle ne réserve pas une place aux conglo-mérats fréquemment liés sur le terrain à des formes bien spécifiques (glacis, terrasses, cônes).

Nous nous demandons en outre si cet auteur n'a pas poussé le souci du détail, de la nuance jusqu'à l'excès, ce qui risque de conduire le pédologue trop scrupuleux à hésiter lors du classement et du tracé des limites de sol sur le terrain.

Enfin, la question fondamentale que nous posons, est la suivante: *les accumulations calcaires (les horizons d'accumulations calcaires (Bca) selon A. RUELLAN), constituent-elles vraiment des horizons caractéristiques, diagnostiques, susceptibles de définir des sols actuels au point de vue génétique?*

Ce n'est pas semble-t-il l'avis des classificateurs américains et de la F.A.O. qui les considèrent comme des horizons secondaires.

Indépendamment de l'interprétation, nous sommes partisan de conserver une nomenclature préalablement bien définie, claire, simple, selon les normes classiques ou écologiques. Un langage complexe, réservé à des initiés risque de décourager les utilisateurs.

Dans le domaine des études pédogénétiques, le point important à préciser, est le lien, les rapports qui existent entre les horizons superficiels, la croûte et l'encroûtement dans les profils des sols actuels.

C'est dans ce but que nous avons entrepris l'étude qui fait l'objet de la deuxième partie.

(¹) Cette classification a été publiée postérieurement à nos travaux sur terrain.