

## Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes :

Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle

Marcel POUGET

*Pédologue, O.R.S.T.O.M. Bureau de Télédétection, Services Scientifiques Centraux, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy*

### RÉSUMÉ

*A l'issue d'une étude des relations sol-végétation dans les steppes algériennes le long d'une séquence bioclimatique d'aridité croissante, des observations nouvelles permettent :*

*— de distinguer deux catégories principales de sols à croûte calcaire: les sols de type I sans horizon laminaire et les sols de type II avec horizon laminaire Kl ;*

*— d'esquisser, dans les conditions bioclimatiques actuelles, un schéma de leur évolution caractérisée par quatre processus: décapage de l'horizon A, décalcification des horizons supérieurs dans les espaces interfeuilletés et l'horizon Kh, induration de l'accumulation calcaire avec formation de pellicules rubanées et de l'horizon laminaire Kl, épigénie calcaire à la base du profil.*

*Dans cette évolution, le système racinaire de la végétation steppique joue un rôle très important.*

### ABSTRACT

**CALCAREOUS CRUST SOILS IN THE ALGERIAN STEPPES: SOME MORPHOLOGICAL ASPECTS AND OUTLINE OF A CURRENT EVOLUTION**

*The study about soil vegetation relationship in the Algerian steppes along a bioclimatic sequence with increasing aridity led to new observations which make it possible :*

*— to distinguish two main types of calcareous-crust soils: type I soils without laminar horizon and type II soils with Kl laminar horizon ;*

*— to give the broad outline of their evolution, under the current bioclimatic conditions, which is characterized by four processes : scouring of horizon A, decalcification of upper horizons in the spaces between flakes and Kh horizon, induration of the calcareous accumulation along with the formation of banded films and Kl laminar horizon and calcareous epigeny at the base of the profile.*

*In this evolution, the root system of the steppe vegetation plays a very important role.*

## Introduction

Depuis fort longtemps, les sols à croûte calcaire ont suscité de très nombreux travaux — que ce soit en Afrique du Nord (DURAND, 1953, 1959; AUBERT, 1947, 1960; BOULAIN, 1957, 1961; RUELLAN, 1970) ou plus généralement dans l'ensemble des régions semi-arides et arides à climat de type méditerranéen ou subtropical. Ce sujet, vaste et complexe, a entretenu et continue à entretenir de larges débats quant à l'origine des croûtes calcaires notamment.

A l'issue d'une étude des relations sol-végétation dans les steppes algériennes le long d'une séquence bioclimatique d'aridité croissante (POUGET, 1980), des observations nouvelles nous permettent :

- de préciser quelques aspects morphologiques et micromorphologiques des sols à croûte calcaire;
- d'esquisser un schéma de leur évolution dans les conditions bioclimatiques actuelles.

## 1. QUELQUES ASPECTS MORPHOLOGIQUES ET MICROMORPHOLOGIQUES DES SOLS A CROÛTE CALCAIRE

Dans les steppes algériennes (climat méditerranéen aride avec P compris entre 400 et 100 mm), les vastes surfaces encroûtées du Quaternaire ancien et moyen attestent de l'extension considérable des sols à croûte calcaire sur des matériaux divers : alluvions, colluvions de piedmont, argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, marno-calcaires et calcaires, grès, etc.

Leur morphologie présente une très grande diversité en fonction de nombreux facteurs : âge de la surface encroûtée, nature du matériau, situation topographique, etc. Certes, depuis les travaux de RUELLAN (1970), il est possible d'arriver à un certain accord concernant la nomenclature des accumulations calcaires dans les sols; c'est d'ailleurs cette nomenclature que nous utilisons pour la description des profils. Par contre, le terme de « sol à croûte calcaire » employé ici englobe les sols à dalle compacte, les sols à encroûtement feuilleté et même certains sols à encroûtement nodulaire de RUELLAN.

Bien que l'on puisse distinguer aisément ces trois types de sols, malgré un grand nombre de profils de transition, les observations de terrain et l'importance accordée au système racinaire de la végétation steppique nous conduisent à établir une autre distinction basée sur l'absence, ou la présence, d'un horizon laminaire Kl au sein du profil. On rejoint dans une certaine mesure les travaux de GILE *et al.*

(1965, 1966) pour distinguer deux types principaux de profils de sols à croûte calcaire :

- les profils de type I sans horizon laminaire,
- les profils de type II à horizon laminaire.

### 1.1. Les deux types de profils de sols à croûte calcaire

LES PROFILS DE TYPE I présentent la succession verticale suivante (fig. 1) :

Horizon A : d'épaisseur variable (10-40 cm); brun à brun rougeâtre; texture de la terre fine généralement moyenne; structure finement lamellaire en surface avec croûte de battance, polyédrique subanguleuse moyenne à fine, peu nette; calcaire (< 25-30 % le plus souvent); débris de croûte; nombreuses racines. Sous végétation forestière, il s'agit d'un horizon plus humifère.

Horizon KCr : croûte calcaire beige-rosé à blanchâtre, comprenant une superposition de feuillets séparés par des espaces subhorizontaux plus ou moins anastomosés entre eux et colonisés par les racines. Selon l'âge de la surface encroûtée, la nature du matériau et plus généralement le degré d'évolution de la croûte, chaque feuillet peut être, en totalité ou en partie, induré en dalle compacte. Les surfaces supérieures, parfois aussi latérales, des feuillets sont tapissées par des pellicules rubanées plus ou moins épaisses et de couleurs différentes — saumon, beige, grisâtre à noirâtre. L'induration des feuillets décroît du sommet vers la base de l'horizon.

Horizon Ke : encroûtement calcaire à structure massive, parfois finement feuilletée à la partie supérieure, ou polyédrique nodulaire avec des nodules plus durcis; quelques racines surtout au sommet de l'horizon.

Horizon CCa : très variable selon le matériau; structure souvent polyédrique grossière avec gros amas et nodules calcaires.

LES PROFILS DE TYPE II À HORIZON LAMINAIRE correspondent au stade IV de GILE avec la succession verticale suivante (fig. 2) :

Horizon A : analogue au précédent.

Horizon Kh : épaisseur variable (0 à 30/40 cm); nombreux fragments de croûte dans une matrice de limon sableux « pulvérulent ». Cette matrice, de couleur toujours différente de A, soit plus grise soit plus beige, est très calcaire (40 à 70 %) avec un chevelu racinaire dense formant tapis sur l'horizon laminaire sous-jacent.

Horizon laminaire Kl (1) : pellicule rubanée peu

(1) Kl correspond à une partie seulement de l'horizon K21m de GILE (laminar horizon), c'est-à-dire la partie centrale la plus indurée (hard lower layer).

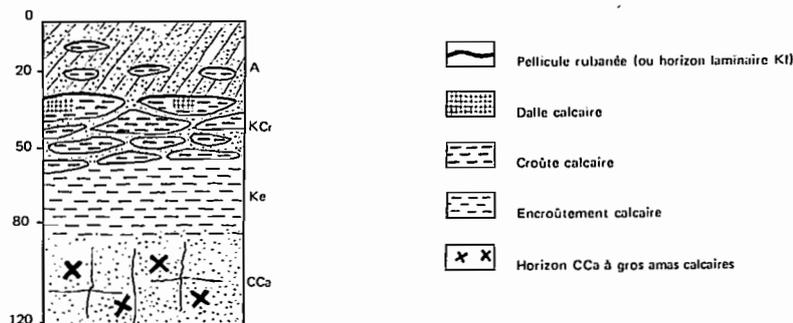


Fig. 1. —

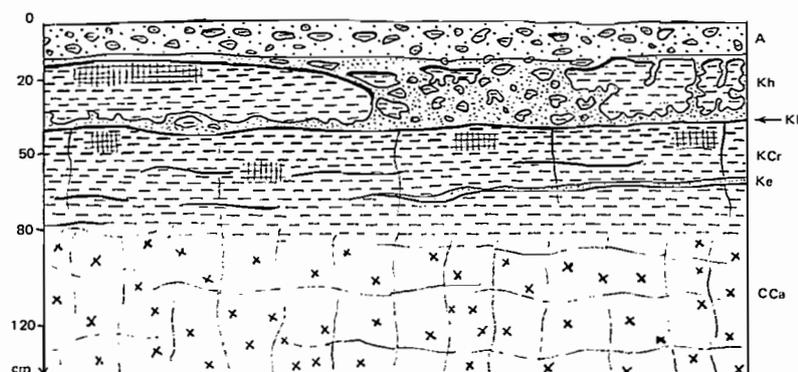


Fig. 2. —

épaisse, quelques millimètres à 2-3 centimètres, constituant un véritable plancher irrégulier mais pratiquement continu au-dessus de la croûte. Un réseau d'étroites fissures permet au système racinaire de s'immiscer en profondeur dans la croûte.

Horizon KCr : croûte calcaire plus ou moins indurée (dalle et/ou croûte) et généralement structurée en feuillets. Les racines se localisent dans les espaces interfeuillets qui ont tendance à s'anastomoser et former un filon continu subhorizontal à la base de la croûte.

Horizon Ke : encroûtement calcaire, très peu de racines.

Horizon CCa : analogue au précédent (cf. type I).

## 1.2. Quelques caractéristiques analytiques et micromorphologiques

Un rappel de quelques résultats analytiques et d'observations micromorphologiques permet de compléter cette description sommaire du point de vue de la matière organique, du calcaire et des sels solubles.

## MATIÈRE ORGANIQUE

Deux points importants sont à souligner :

— on constate une *concentration de matière organique dans l'horizon Kh et dans les espaces interfeuillets* en relation avec la concentration du système racinaire de la végétation steppique. Les taux de matière organique sont généralement de 2 à 5 fois plus élevés que dans les horizons A. Cela est particulièrement net dans les zones où la pluviosité varie entre 200 et 300 mm/an (aride moyen);

— on constate une *différence de nature de la matière organique* entre les horizons Kh et les horizons A (POUGET et AUBERT, 1978; POUGET, 1980) :

— dans les horizons A de surface, la nature des composés humiques est sous la dépendance des bioclimats et des types de formations végétales : dominance des acides humiques gris et de l'humine dont les taux augmentent avec l'aridité du climat et la dégradation du couvert végétal (série classique : forêt de Pin d'Alep-matorrals, steppes à alfa, steppes à chamaephytes, cultures). Pour un même bioclimat et une même formation végétale, steppe à alfa par exemple, le type de matière organique reste prati-

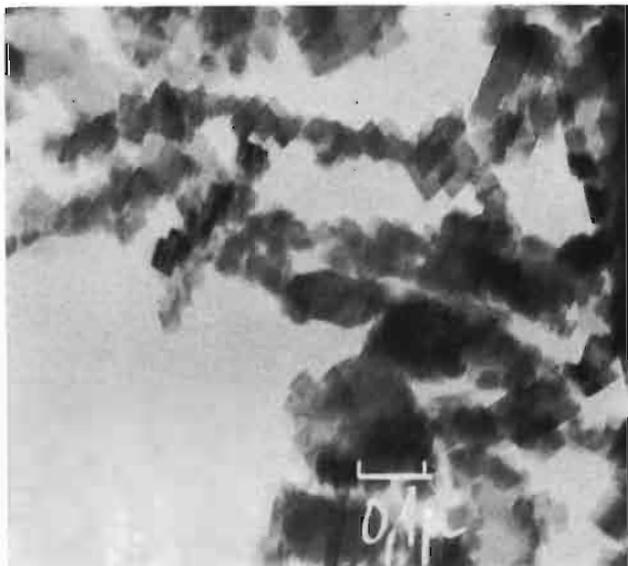


Photo 1. — (MET) Calcite en fins rhomboédres dans feuillet de croûte calcaire encore peu induré.

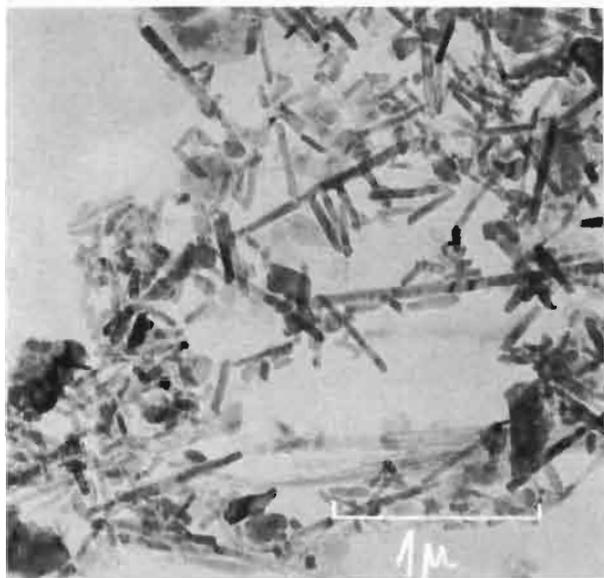


Photo 2. — (MET) Calcite en bâtonnets dans horizons Kh.

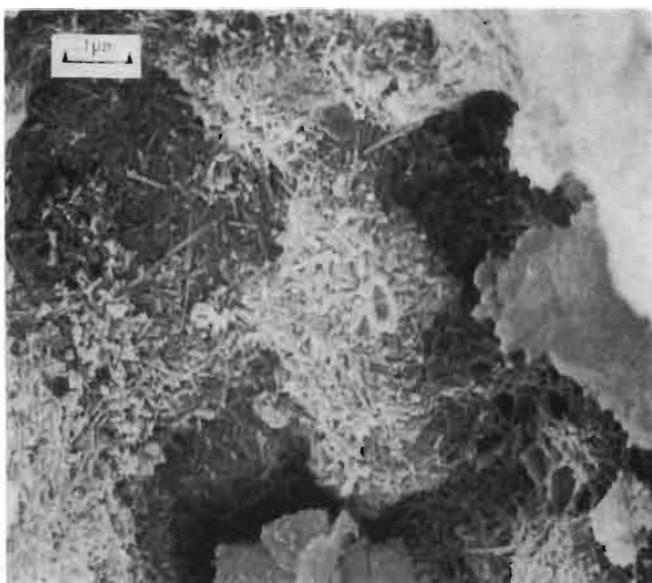


Photo 3. — (MEB) Calcite en bâtonnets dans une sphérolithe de la matrice pulvérulente de l'horizon Kh.

quement identique pour l'ensemble des sols à croûte calcaire et des sols formés sur calcaires durs, marno-calcaires ou grès (sols analogues) ;

— dans les horizons Kh et dans les espaces interfeuilletés, l'influence du carbonate de calcium et des ions  $\text{Ca}^{++}$  détermine au contraire une forte prédominance des acides fulviques « libres ».

#### CALCAIRE

Les observations se situent à 4 niveaux des profils :

Dans les horizons A, les fragments de croûte calcaire présentent une zone corticale externe plus colorée par des oxydes de fer et surtout par des particules argileuses. A l'œil nu, ce cortex d'altération donne aux débris de croûte un aspect « sali » et terreux que l'on retrouve aussi à l'intérieur des fragments eux-mêmes, sur la paroi des nombreux vides. Très souvent, ces fragments correspondent aux accumulations calcaires les plus denses et les plus indurées : pellicules rubanées, dalle compacte, croûte ou nodules. Leur taille va de quelques centimètres à quelques dixièmes de millimètres et l'on passe alors à des sphérolithes de calcite réparties çà et là dans l'horizon. Entre ces reliques de croûte, la terre fine reste peu calcaire et l'on n'observe pratiquement pas de figures de recristallisation de calcite.

Dans l'horizon Kh, la croûte est représentée par des feuilletés le plus souvent bien individualisés et disposés subhorizontalement. A l'œil nu, les figures d'altération et de dissolution s'observent très nettement à la partie inférieure des feuilletés où la croûte plus légère et plus poreuse, est creusée de golfes de corrosion envahis par la matrice pulvérulente et le système racinaire.

L'étude micromorphologique montre que :

— la matrice pulvérulente est constituée presque exclusivement de sphérolithes (20 à 100  $\mu$  de diamètre) de calcite micritique. Il en est de même dans les espaces interfeuilletés de KCr ;

— les débris de croûte présentent des faciès variés selon leur emplacement dans le feuillet initial :

la partie inférieure apparaît comme un cristalliplasma assez lâche de calcite micritique avec des « noyaux » plus individualisés qui semblent se « libérer » peu à peu pour rejoindre les sphérolithes constituant la matrice pulvérulente.

la partie supérieure, généralement plus indurée, pellicule rubanée ou dalle, est au contraire un cristalliplasma micritique très dense, « taradé » par de nombreux vides où l'on observe souvent des cristaux de calcite en aiguilles de 20 à 100  $\mu$  de long (lublinite).

Dans l'horizon laminaire Kl, et plus généralement au niveau des accumulations les plus indurées,

dalles, pellicules rubanées, croûtes et nodules durcis, la calcite se présente également sous la forme d'un cristalliplasma micritique très dense.

A la base du profil, dans l'horizon CCa, on reconnaît les principaux processus d'épigénie calcaire décrits récemment par MILLOT *et al.* (1977) : altération argileuse, calcitisation dans les lumières des microfissures (lublinite, micrite), épigénisation de la masse de l'horizon avec des « nuages » de micrite qui s'installent dans les grains de quartz, etc.

En outre, l'examen au microscope électronique MET et MEB permet de distinguer deux faciès principaux de calcite micritique :

— la calcite en rhomboédres, plus ou moins nets et d'épaisseur variable, caractérise les dalles, les pellicules rubanées anciennes, les noyaux indurés et compacts dans les croûtes et les encroûtements. Les rhomboédres, épais (opaques au MET) au niveau des dalles, sont beaucoup plus fins et plus nets dans les croûtes encore peu indurées (photo 1) ;

— la calcite en bâtonnets (photo 2) correspond à des cristaux allongés de 0,1 à 2-3  $\mu$ , rarement davantage, souvent regroupés et enchevêtrés les uns dans les autres pour former un véritable treillis (aspect « nid de pie »). Très abondants dans la matrice pulvérulente des horizons Kh, ils s'observent également dans les parties poreuses et peu denses des feuilletés de croûte et des encroûtements ainsi que dans les horizons laminaires grisâtres les plus récents — les bâtonnets sont alors plus courts et irréguliers (observations au MET).

Dans la matrice pulvérulente des horizons Kh et des espaces interfeuilletés, la plupart des sphérolithes de calcite micritique sont creusées, comme une « éponge », de cavités tapissées par un réseau très dense de bâtonnets (photo 3). Alors que la partie externe des sphérolithes est constituée de cristaux très émoussés et arrondis, en voie de dissolution, les bâtonnets apparaissent nettement comme une recristallisation secondaire de calcite qui trouve ici une structure d'accueil favorable, les cavités à l'intérieur des sphérolithes.

#### SELS SOLUBLES

On constate très souvent une accumulation saline plus ou moins importante au sein des sols à croûte calcaire. Cette accumulation dépend pour une large part de la situation topographique, des bioclimats et du type de sol.

On observe ainsi une salure discontinue, mais localement très élevée (jusqu'à 20-30 mmhos-cm) dans la matrice pulvérulente des horizons Kh pour les profils situés dans les parties aval des toposéquences recevant entre 200 et 300 mm de pluies par an (aride moyen). Une salinité excessive peut

alors se manifester en surface avec les « plages de salure » (POUGET, 1980).

En zones plus humides (P supérieur à 300 mm), les sels s'accumulent à la partie inférieure des horizons KCr, ou sont entraînés latéralement vers les axes de drainage. En zones plus arides (P inférieur à 200 mm), la dynamique des sels, comme celle de l'eau, est fortement ralentie et ne parvient pas à se hiérarchiser et à s'organiser pour aboutir à des concentrations comparables aux précédentes.

Enfin, il est important de souligner que des salures aussi élevées augmentent la solubilité du carbonate de calcium et favorisent sa dynamique actuelle.

### Conclusion

Deux faits importants sont à retenir concernant la dynamique de l'eau dans les profils et la destruction de la croûte dans les horizons supérieurs.

L'importance accordée au système racinaire, pour distinguer les deux principaux types de sols à croûte calcaire, revient en fait à rendre compte, en zones arides, d'une certaine dynamique de l'eau. L'absence ou la présence d'horizon laminaire conditionne en effet le développement des racines, mais aussi le régime hydrique du profil et par là, l'évolution actuelle des sols du point de vue de la matière organique, de la dynamique du calcaire et des sels :

— dans les profils de type I, le drainage vertical, comme l'implantation du système racinaire, se fait en profondeur par les espaces interfeuilletés. La dynamique de l'eau tend à être verticale et profonde ;

— dans les profils de type II, le drainage vertical, comme le système racinaire, est bloqué par l'horizon laminaire. La dynamique de l'eau tend à être latérale et subsuperficielle au niveau de l'horizon Kh.

On vérifie, à la suite de nombreux auteurs, la destruction (*litholyse*) de la croûte dans les horizons supérieurs des profils :

— dans les horizons A, il s'agit d'un stade très avancé où ne subsistent que les fragments les plus résistants, dalles et pellicules rubanées. L'ambiance physicochimique apparaît plus calcique que calcaire comme le montrent la nature des composés humiques et l'absence de figure de recristallisation ;

— dans les horizons Kh et les espaces interfeuilletés, il s'agit d'une zone active de destruction de la croûte. L'ambiance physicochimique est celle d'un milieu poreux très calcaire comme l'indiquent la nature des composés humiques et les figures de recristallisation de calcite. Le bilan global est incontestablement à un départ de calcaire.

## 2. ESQUISSE D'UNE ÉVOLUTION ACTUELLE DES SOLS A CROÛTE CALCAIRE

### 2.1. Distribution dans le paysage des deux types de sols à croûte calcaire

La figure 3 illustre, avec un exemple de chronotoposéquence, la localisation des sols et les passages latéraux d'un type de profil à l'autre.

Ainsi, un certain nombre de facteurs s'avèrent favorables à la formation des horizons laminaires : âge de la surface encroûtée, situation topographique, nature du matériau, etc. Toutes choses étant égales par ailleurs, l'horizon laminaire est d'autant mieux développé, plus épais et plus induré que :

- la surface est plus ancienne ;
- le profil est situé dans les zones aval des glacis, en particulier au niveau des talus de raccordement où la circulation latérale des solutions est plus superficielle ;
- le matériau est graveleux ou présente une différence texturale.

Compte tenu de ces facteurs, il est intéressant de préciser la distribution des profils à horizon laminaire en fonction des conditions écologiques actuelles : bioclimats et végétation.

— Les profils de type II s'observent dans l'ensemble des steppes algériennes, mais deviennent très rares en zones plus humides (P > 400 mm) où ils se localisent de préférence sur les surfaces du Quaternaire moyen.

— Très rares sous végétation forestière, ils se retrouvent le plus souvent sous végétation steppique. Deux cas sont à considérer en fonction de l'âge de la surface encroûtée :

. sur les surfaces du Quaternaire ancien, les horizons Kl sont plus profonds et moins fréquents sous les steppes à alfa ;

. sur les surfaces du Quaternaire moyen, les horizons Kl s'observent aussi bien sous steppe à alfa que sous steppe secondaire à chamaephytes.

### 2.2. Schéma d'une évolution dans le temps

L'observation de très nombreux profils dans les toposéquences permet d'esquisser une évolution dans le temps. En prenant l'exemple des surfaces formées sur un matériau homogène, les argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, il est possible de schématiser les principaux stades d'une évolution verticale du profil de sol à croûte calcaire (fig. 4) :

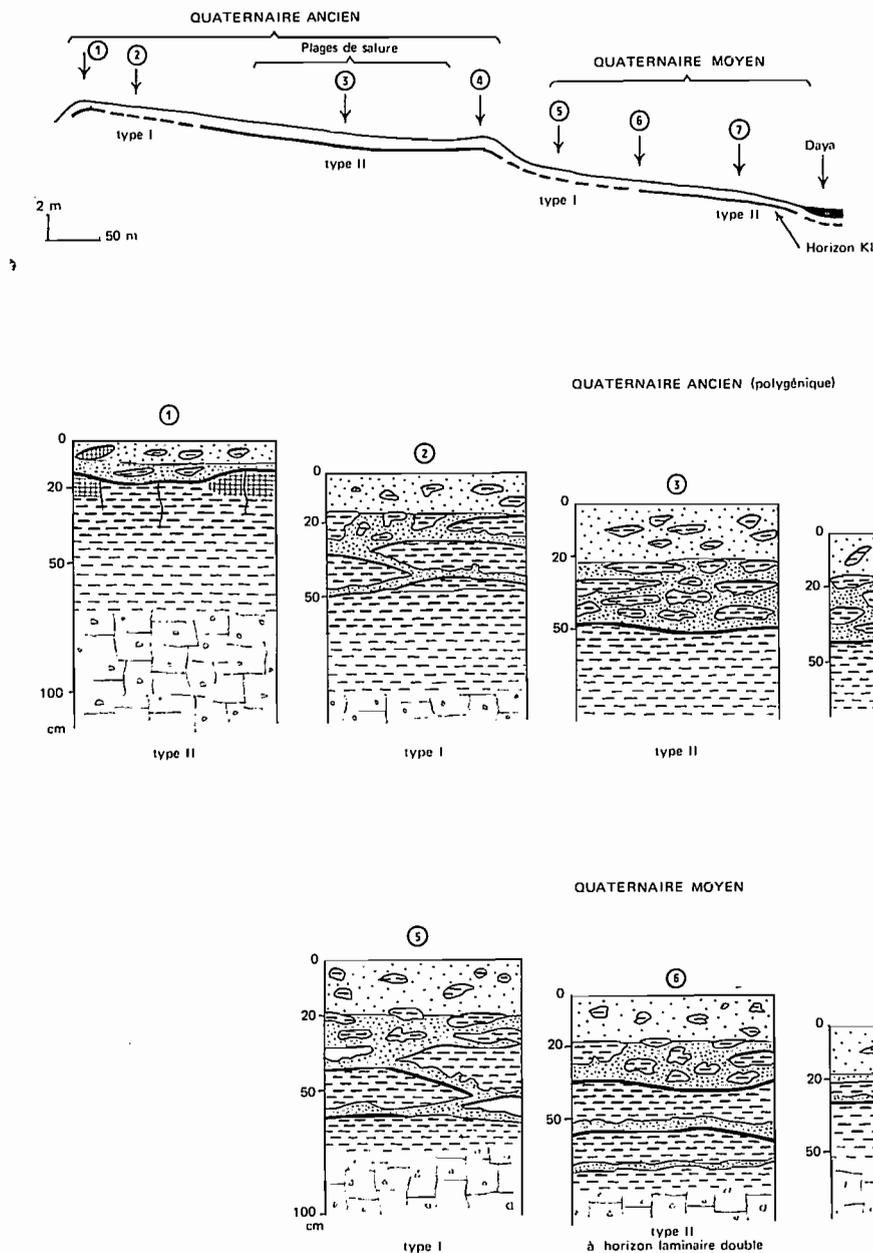


Fig. 3. — Exemple de distribution des sols à croûte calcaire en fonction de l'âge des surfaces encroûtées et de la situation topographique (steppe à chamaephytes et alfa rélictuel).

- ① — stade initial à horizon A humifère, éventuellement sous végétation forestière (stade facultatif).
- ② ③ — Stades de sols à croûte calcaire de type I.
- ④ ⑤ — Individualisation progressive de l'horizon laminaire Kl<sub>1</sub> et de l'horizon Kh<sub>1</sub>. L'érosion en nappe continue le décapage de l'horizon A

- ⑥ — Stade du profil type à horizon laminaire.
- ⑦ — Formation d'un second horizon laminaire Kl<sub>2</sub>. La présence de fissures verticales permet au système racinaire de s'immiscer plus ou moins à l'intérieur de la croûte et de dégager

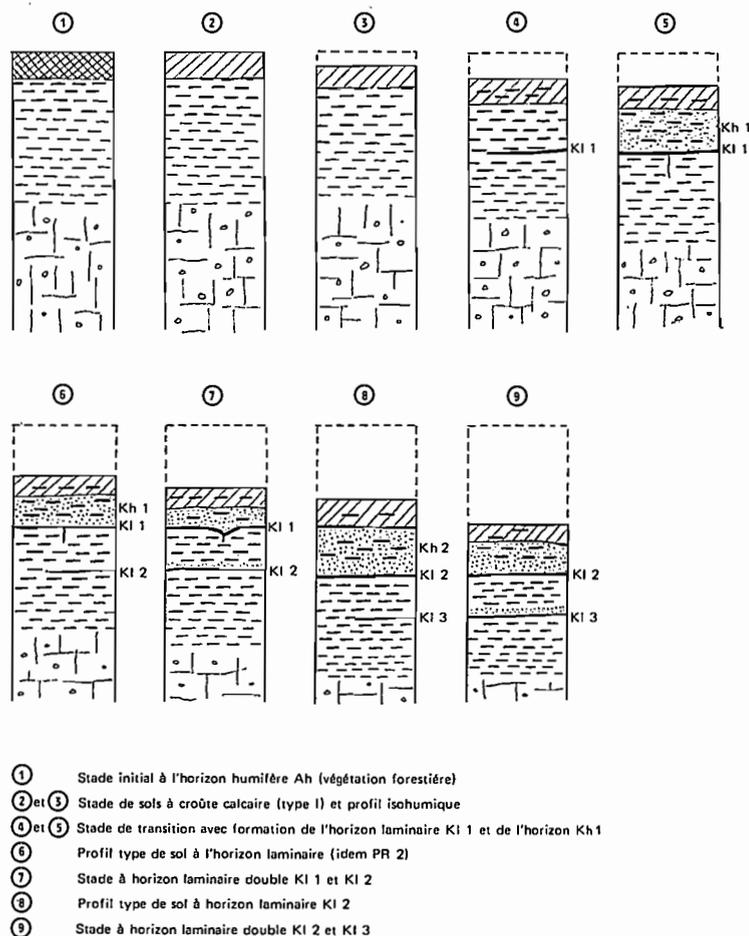


Fig. 4. — Schématisation de l'évolution dans le temps des sols à croûte calcaire : — décapage de l'horizon A ; — décalcarification des horizons supérieurs dans les espaces interfeuillets et l'horizon Kh ; — induration de l'accumulation calcaire avec formation des pellicules rubanées et des horizons Kl ; — épigénie calcaire à la base du profil.

des espaces interfeuillets. Il le fait d'autant plus facilement que la masse encroûtée n'est pas trop indurée (Quaternaire moyen) et qu'il est lui-même suffisamment « agressif ».

- ⑥ — L'horizon laminaire  $Kl_1$  et les feuillets sous-jacents sont progressivement détruits pour former  $Kh_2$ .
- ⑨ — L'évolution se poursuit avec l'individualisation d'un troisième horizon laminaire  $Kl_3$ .

En définitive, un tel schéma illustre, pour les profils de sols à croûte calcaire, une dynamique d'ensemble déjà envisagée par RUELLAN *et al.* (1977). Elle peut se caractériser par quatre processus : décapage de l'horizon A, décalcarification des horizons supérieurs, reformation et induration des feuillets de croûte, épigénie calcaire à la base du profil.

Le décapage de l'horizon A par l'érosion en nappe oblige le système racinaire à s'enfoncer davantage. L'horizon se développe aux dépens des feuillets supérieurs de la croûte.

La décalcarification des horizons supérieurs détruit les feuillets de croûte qui se reforment peu à peu en profondeur. Cette décalcarification s'effectue au niveau des espaces interfeuillets et au niveau des horizons Kh dans une zone d'intense activité du système racinaire.

Dans les sols de type II, l'enfoncement du front de décalcarification ne se fait pas aussi régulièrement, ni semble-t-il aussi vite, que dans les sols de type I. La présence de l'horizon laminaire détermine une dynamique différente, la progression se faisant par « tranches ». Alors que la destruction se poursuit dans Kh, le système racinaire prépare une nouvelle

« tranche » de croûte en individualisant, au-dessous, d'autres espaces interfeuilletés et un autre horizon Kh. Comme pour les feuilletés de croûte, l'épaisseur des tranches est plus faible au niveau des zones de drainage (rupture de pente, bordure de thalwegs) et plus importante dans les zones planes.

La décalcarification s'accompagne d'une recristallisation secondaire de calcite en très fins bâtonnets dans toutes les structures d'accueil favorables créées par la destruction des feuilletés, microcavités à l'intérieur des sphérolithes par exemple. La taille et la forme des cristaux serait en relation avec plusieurs facteurs :

— dans ce milieu poreux et très calcaire où l'activité du système racinaire est intense, les alternances rapides dissolution-dépôt favorisent une cristallisation en petits cristaux d'autant qu'il existe de très nombreux sites de croissance;

— la présence d'ions étrangers tel le magnésium contribue à la formation de cristaux allongés. Le magnésium est en effet généralement abondant comme en témoignent la salure des horizons Kh et l'importance de l'attapulgite dans le profil;

— la présence de composés organiques qui pourraient être adsorbés sur les sites de croissance gênerait la formation de cristaux de type rhomboédrique (DURAND, 1978).

La reformation des feuilletés de croûte en profondeur se traduit par une *induration de l'accumulation calcaire* à deux niveaux :

— d'une part, les pellicules rubanées et l'horizon laminaire se forment à la base des espaces interfeuilletés et de l'horizon Kh. L'induration résulterait d'un « colmatage » du plancher des espaces interfeuilletés par un dépôt de calcite en bâtonnets. Les pellicules rubanées et les horizons laminaires grisâtres, les plus récents, sont effectivement constitués de calcite en bâtonnets qui, avec le temps, évolueraient en rhomboédres tels qu'on les observe dans les pellicules de couleur saumon, les plus anciennes et les plus indurées;

— d'autre part, la croûte elle-même, au-dessous des pellicules rubanées et de l'horizon laminaire, a tendance à s'indurer. Dans ce milieu peu poreux et protégé de l'influence racinaire directe, la diffusion des solutions saturées se fait lentement car les équilibres sont longs à s'établir à travers la microporosité. Cela favorise une cristallisation de calcite en rhomboédres. Dans les croûtes encore peu indurées, il s'agit de fins rhomboédres (photo 1) devenant beaucoup plus épais et jointifs dans les dalles compactes.

On assiste ainsi à une véritable « maturation » des cristaux de calcite avec pour résultat une induration,

et à la limite une « pétrification », de l'accumulation calcaire.

— Le quatrième processus, l'*épigénie calcaire*, contribue à propager l'accumulation calcaire en profondeur dans l'encroûtement et surtout dans l'horizon CCa.

En conclusion, avec le temps, les profils à croûte calcaire s'enfoncent peu à peu dans le paysage malgré le troisième processus, l'induration de l'accumulation calcaire, qui tend à ralentir cette évolution. Latéralement, les profils de type II envahissent le modelé en remontant vers l'amont des toposéquences. Ils contribuent à l'aplanissement des versants encroûtés.

Ainsi pour les surfaces les plus anciennes (Quaternaire ancien), formées sur un matériau relativement tendre et homogène, les argiles sableuses rouges du Tertiaire continental, on aboutit à un *stade de vieillissement* caractérisé par une topographie subhorizontale et par des sols de type II à dalle calcaire très épaisse. Ces horizons d'accumulation fortement indurés jouent le rôle de roche calcaire dure sur laquelle se surimpose une pédogenèse de type karstique avec, par exemple, la formation de dayas si fréquents dans les steppes algériennes. Cette évolution a pu être remise en cause par des mouvements tectoniques au cours du Quaternaire (glacis polygéniques).

Sur un matériau alluvial ou colluvial plus hétérogène et caillouteux, l'induration de l'accumulation calcaire devient très forte (dalle conglomératique) et freine l'enfoncement des profils; cela explique une plus faible évolution des versants dans ce cas.

### 2.3. Évolution actuelle des sols à croûte calcaire

Dans les conditions bioclimatiques actuelles les quatre processus envisagés précédemment interviennent plus ou moins efficacement en fonction des caractéristiques des horizons encroûtés et des facteurs qui conditionnent le profil hydrique des sols, situation topographique, état de la surface, bioclimats, végétation. Ainsi, lorsque les horizons encroûtés sont déjà très fortement indurés, compacts, caillouteux et épais, l'évolution actuelle se trouve limitée. Il en est de même lorsque la pluviosité est inférieure à 200 mm/an.

Le décapage de l'horizon A sera favorisé par tout ce qui tend à accentuer l'érosion en nappe ou éventuellement l'érosion éolienne : pente, texture de l'horizon de surface, dégradation du couvert végétal, etc.

La décalcarification des horizons supérieurs et la destruction des feuilletés de croûte sera d'autant

plus efficace que le climat est humide, l'activité du système racinaire importante, l'induration faible, etc.

La formation et l'évolution des pellicules rubanées et des horizons laminaires sera fonction de l'intensité des processus précédents. Par contre, la « maturation » des accumulations est privilégiée par la stabilité verticale des profils. Comme l'épigénie calcaire, elle se poursuit dans l'ensemble de la zone steppique.

Pour rendre compte d'une très grande diversité de situations possibles, il est commode d'envisager des schémas d'évolution dans les principaux bioclimats le long d'une séquence d'aridité croissante.

*P = 300-400 mm (aride supérieur)*

Le système racinaire de la végétation steppique vivace participe activement à l'approfondissement des profils de sols à croûte calcaire : destruction des feuillets supérieurs, formation et évolution des horizons laminaires encore relativement profonds. Cet approfondissement compense sensiblement les effets de l'érosion en nappe qui décape la partie supérieure de l'horizon A. Pour la végétation de steppe, surtout une steppe à alfa, le complexe sol-végétation représente un véritable système biogéodynamique en équilibre relatif.

La dégradation du couvert végétal par surpâturage ou mise en culture a pour conséquence un ralentissement important de l'évolution de la croûte. Celle-ci tend à devenir davantage un support pour le sol dont l'épaisseur diminue sans que le système racinaire puisse participer à l'approfondissement du profil. Cependant un retour à la végétation de steppe à chamaephytes est possible si l'action de l'homme est suffisamment « volontaire » en ce sens.

*P = 200-300 mm (aride moyen)*

Dans ces zones plus arides, les processus de pédogenèse deviennent de plus en plus superficiels : l'horizon A est moins épais, l'horizon Kh très humifère souligne la « pression » du système racinaire sur l'horizon laminaire proche de la surface, les sels ont tendance à s'accumuler localement au-dessus de la croûte, etc. Cela est particulièrement net sur les surfaces encroûtées les plus anciennes dans les zones aval des toposéquences où la steppe à alfa cède la place à une steppe secondaire à chamaephytes. Ce changement de végétation apparaît à la fois comme un effet et une cause des processus de salinisation et de la généralisation des horizons laminaires toujours plus proches de la surface en raison du décapage de l'horizon A. Le complexe sol-végétation exprime un système biogéodynamique en déséquilibre et en voie de désertisation.

La destruction du couvert végétal par l'homme

accentue cette dégradation irréversible des sols et de la végétation. L'approfondissement du profil est bloqué et la végétation steppique vivace ne peut pratiquement plus se réinstaller sur les surfaces les plus anciennes à cause de l'horizon laminaire et localement de la salure. Par contre, l'induration se poursuit.

*P = 100-200 mm (aride inférieur)*

En raison de l'aridité, l'activité insuffisante du système racinaire n'exerce pas d'influence efficace sur la dynamique du calcaire et des sels. Le régime hydrique n'autorise qu'une décalcarification limitée pratiquement à l'horizon A. La dynamique latérale dans les horizons Kh reste très faible, sinon épisodique. Le décapage de l'horizon A souligne, comme dans l'ensemble de la steppe, l'importance du ruissellement en nappe. Une évolution des profils est alors encore possible dans les zones où les eaux se concentrent, en particulier dans les chenaux d'oueds alluvionnés et les dayas. Par contre, ici aussi, les processus d'induration et de maturation se poursuivent au sein des feuillets supérieurs de croûte.

### 3. CONCLUSION

Dans les steppes algériennes, la végétation steppique joue un rôle important dans l'évolution actuelle des sols à croûte calcaire ( $P > 200$  mm). Par son système racinaire, elle participe à un certain approfondissement des profils avec la destruction de la partie supérieure de la croûte au niveau des espaces interfeuillets et des horizons Kh.

La formation des horizons laminaires Kl se poursuit actuellement au sein des sols à croûte calcaire. Elle est favorisée par tout ce qui a tendance à altérer le profil hydrique et à diminuer la profondeur de l'enracinement, en particulier :

- la dégradation du couvert végétal dans le sens : végétation forestière, steppe à alfa, steppe à chamaephytes;

- l'aridité croissante dans un contexte climatique ni trop humide ni trop sec ( $P$  compris entre 400 et 200 mm);

- la situation topographique (pente) et la nature du matériau (différence texturale).

La mise en valeur des sols à croûte calcaire ne peut ignorer la présence très fréquente d'horizons laminaires. Cette caractéristique morphologique majeure conditionne non seulement le profil hydrique, mais aussi l'efficacité de certaines techniques d'aménagement — rootage pour les plantations forestières par exemple.

## interventions des participants

G. MILLOT : Cette contribution est très intéressante, car nous sont présentées les figures de dégradation des encroûtements calcaires. Figures supérieures, internes et basales. Et comme pour les cuirasses ferrugineuses, nous prenons connaissance, après tant de travaux sur la genèse des accumulations, des figures de dégradation avec des analogies, qui ne sont pas des homologies.

C. SYS : Dans le bassin sédimentaire d'Iran, nous avons eu l'occasion d'étudier l'évolution des accumulations calcaires et des minéraux argileux.

Les dépôts récents ne présentent aucune accumulation secondaire de  $\text{CaCO}_3$ , et la minéralogie des argiles est dominée par la montmorillonite avec des traces d'illite. Les dépôts subrécents présentent une redistribution de  $\text{CaCO}_3$  exprimée par un mycelium calcaire dans morphologie du profil; en même temps, l'attapulгите augmente légèrement. Au niveau de la terrasse du Pleistocène supérieur, le  $\text{CaCO}_3$  se présente sous forme de nodules, et l'attapulгите devient très importante dans la fraction argileuse.

Finalement, les surfaces du Pleistocène moyen et inférieur sont coiffées de croûtes calcaires; les argiles associées sont essentiellement de l'attapulгите, cependant associée avec un peu de montmorillonite.

A. RUELLAN : Le type II n'est peut-être pas seulement le résultat de la dégradation de la croûte sous-jacente. Je pense qu'il y a aussi construction au-dessus de la dalle et de la pellicule rubanée d'un nouvel horizon d'accumulation de calcaire.

J. DURAND : Des croûtes zonaires se trouvent en Afrique du Nord, mais aussi aux Canaries à Lanzarote, au Yémen, à Djibouti et à Madagascar, aux environs de Sakaraha.

Dans les croûtes de Lanzarote, l'argile identifiée est la vermiculite.

G. AUBERT : L'exposé très clair de M. POUGET et la longue discussion qui l'a suivi, montrent toute l'évolution, depuis les années 1935-1945 où quelques pédologues ou géologues comme J. H. DURAND, moi-même et d'autres, entreprenaient leur étude « connaissances sur ces sols à croûte calcaire », leurs divers modes de formation encore que ce point ait été à peine effleuré par suite du manque de temps. Des recherches doivent être poursuivies sur le terrain ainsi qu'au laboratoire (micromorphologie, minéralogie approfondie, peut-être expérimentation). Elles peuvent porter plus particulièrement, me semble-t-il sur :

— la typologie de ces sols et leurs relations avec les différents facteurs tels que conditions climatiques et végétations actuelles et passées (?); géomorphologie, topographie; nappe phéatique, le cas échéant;

— leur évolution actuelle dans divers cas bien précis, en fonction des facteurs précédents, et, plus particulièrement le rôle de la végétation et de la matière organique sur cette évolution;

— la dynamique de l'eau (et profondeur de pénétration), du calcaire et des sels dans ces divers types de sols;

— leur mode d'évolution et de formation et le rôle qu'y jouent l'épigénie et les actions mécaniques.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1947. — Les sols à croûtes calcaires. *Conf. Pédolog. médil., Montpellier-Alger* : 330-332.
- AUBERT (G.), 1960. — Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. *Actes Coll. U.N.E.S.C.O. de Paris sur les problèmes de la zone aride* : 127-150.
- BOULAIN (J.), 1957. — Étude des sols des Plaines du Chélif. *Thèse Doct. État, Alger* : 582 p.
- BOULAIN (J.), 1961. — Sur le rôle de la végétation dans la formation des carapaces calcaires méditerranéennes. *C.R. Acad. Sc.*, 253 : 2568-2570.
- DURAND (J.-H.), 1953. — Étude hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. *Publ. Gouv. Gén. Algérie; S.E.S., Alger*, 209 p.
- DURAND (J.-H.), 1959. — Les sols rouges et les croûtes en Algérie. *S.E.S., Alger*, 188 p.
- DURAND (R.), 1978. — La pédogenèse d'une rendzine encroûtée développée sur la craie à poches de cryoturbation en Champagne. *Thèse Doct. État, Strasbourg*.
- GILE (L. H.), PETERSON (F. F.) and GROSSMAN (R. B.), 1965. — The K horizon. A master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Science (Ballimore)*, 99, 2 : 74-82.
- GILE (L. H.), PETERSON (F. F.) and GROSSMAN (R. B.), 1966. — Morphological and genetics sequences of carbonate accumulation in deserts soils. *Soil Science (Ballimore)*, 101, 5 : 347-360.
- MILLOT (G.), NAHON (D.), PAQUET (H.), RUELLAN (A.) et TARDY (Y.), 1977. — L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride, AntiAtlas, Maroc. *Sci. Géol., Bull., Strasbourg*, 30, 3 : 129-152.
- POUGET (M.) et AUBERT (G.), 1978. — La matière organique dans les steppes algériennes. *Comm. au XI<sup>e</sup> Congrès de l'I.S.S.S., Edmonton*, p. 386.
- POUGET (M.), 1980. — Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M., n° 116*, 555 p.
- POUGET (M.) et RAMBAUD (D.), 1980. — Quelques types de cristallisation de calcite dans les sols à croûte calcaire (steppes algériennes). Apport de la microscopie électronique. *Réunion Carbonates, Bordeaux* (à paraître).
- RUELLAN (A.), 1970. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de Basse-Moulouya (Maroc oriental). Contribution à la connaissance des sols méditerranéens. *Mém. O.R.S.T.O.M., n° 54*, 302 p.
- RUELLAN (A.), NAHON (D.), PAQUET (H.) et MILLOT (G.), 1977. — Géochimie de la surface et formes du relief. IV. Rôle des encroûtements et épigénies calcaires dans le façonnement du modelé en pays aride. *Sci. Géol., Bull., Strasbourg*, 30, 4 : 283-288.