

MORPHOLOGIE ET REPARTITION DES SOLS CALCAIRES DANS LES REGIONS MEDITERRANEENNES ET DESERTIQUES

par ALAIN RUELLAN

I. INTRODUCTION.

Dans les régions méditerranéennes et désertiques, les sols qui contiennent du calcaire dans un ou plusieurs de leurs horizons sont très fréquents. Il y a ceci deux raisons principales:

— les roches: elles sont, dans ces régions, fréquemment carbonatées, calcaires et dolomitiques, ou simplement riches en calcium (les basaltes par exemple);

— les climats: ils sont souvent très arides et partout les régimes pluviométriques sont peu favorables à un entraînement profond des solutions et, en conséquence, à un lessivage du calcaire hors des sols.

La dénomination et la classification de ces sols sont très variées. Je rappellerai en particulier que:

— dans le cadre de la classification française (C.P.C.S., 1967) ils sont pour la plupart regroupés parmi les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques, les sols fersiallitiques à réserve calcique;

— dans le cadre de la classification américaine (U.S.D.A., 1967) ce sont, selon les cas, des inceptisols (xerochrepts), des aridisols (argids et orthids), des mollisols (rendolls et xerolls) des alfisols (xeralfs);

— dans le cadre de la légende de la carte mondiale des sols (Dudal, 1968) ce sont, selon les cas, des fluvisols, des rendzinas, des yermosols, des xerosols, des castanozems, des cambisols.

Ces sols calcaires sont en général caractérisés par la présence de trois horizons principaux:

— dans la partie moyenne du sol, un horizon d'accumulation du calcaire: c'est un horizon *Bca*, qui peut être plus ou moins développé;

— au-dessus, un horizon A moins calcaire: il peut être non calcaire;

— au-dessus, un horizon C, également moins calcaire que l'horizon *Bca*.

La distribution du calcaire dans ces trois horizons, qui sont étroitement liés entre eux, définit le profil calcaire; c'est le caractère essentiel de ces sols calcaires qui sont en fait des sols à profil calcaire différencié; c'est ainsi que

je les dénomme dans la suite du texte, ce qui ne permet pas de les décrire sans entrer dans la polémique de la dénomination et de la classification des divers types de sols. Je précise que, de façon à limiter un peu mon sujet, je n'inclus par parmi les sols calcaires étudiés dans le présent article, ceux qui sont aussi nettement marqués par des caractères vertiques, andiques, halomorphes et hydromorphes.

II. L'ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS A PROFIL CALCAIRE DIFFERENCIE.

Quatre caractères permettent de définir l'organisation morphologique des principaux types de sols à profil calcaire différencié: le calcaire, la texture, la couleur et la structure. En outre, l'étude de ces caractères et de leurs variations, dans les profils verticaux et dans les chaînes de sols, permet de saisir, d'une part les mécanismes de leur genèse, d'autre part l'essentiel de leur fertilité.

A. Morphologie et répartition du calcaire

1. LES FORMES DU CALCAIRE DANS LES SOLS.

Le calcaire peut être distribué et individualisé de trois façons différentes (voir tableau):

a) *Distribution diffuse*

Le calcaire mis à part les graviers et cailloux provenant de la rochemère, n'est présent que sous la forme de particules fines, de dimensions égales ou inférieures à 1 mm. A l'oeil nu, il est donc souvent assez difficile de reconnaître l'existence de ce calcaire.

b) *Concentration discontinues*

Le calcaire devient visible: il est concentré, individualisé, en un certain nombre de points séparés les uns des autres par des zones moins calcaires à distribution diffuse (ces zones peuvent même être très peu calcaire).

Les principales formes que ces concentrations discontinues peuvent avoir sont les suivantes:

— Les *pseudo-mycéliums*, qui soulignent la porosité des horizons, et en particulier les pores d'origine radiculaire.

— Les *amas friables*, dont les formes et les dimensions sont variées. De couleur blanche à crème, avec taches de teintes rouge ou noire, il s'agit en général d'une forte concentration, non consolidée, de calcaire qui imprègne un ou plusieurs agrégats. Les limites de ces amas sont plus ou moins nettes.

Il peut s'agir aussi de fines pellicules de calcaire qui tapissent les parois des agrégats ou les surfaces des graviers et cailloux.

— Les *nodules*; ce sont des amas durs: à l'état sec, on ne peut pas les écraser avec les doigts. Comme pour les amas friables, les formes et les dimensions sont variées. Le plus souvent, ils sont plutôt sphériques. Leur volume dépasse rarement quelques centimètres cubes. Leur dureté varie souvent d'une façon importante en fonction de leur humidité: tendres quand on les prélève dans un horizon humide, ils durcissent rapidement en séchant à l'air.

c) *Concentrations continues*

A partir du moment où, dans un horizon, la concentration du calcaire, qu'elle soit diffuse, en amas ou en nodules, devient telle qu'elle fait disparaître, en très grande partie ou totalement, la couleur brune ou rubéfiée habituelle des sols et des dépôts, on donne à cet horizon le nom *d'encroûtement calcaire*. La teneur en carbonates est alors le plus souvent supérieure à 60% et la consolidation de l'horizon peut être très accentuée.

Il y a plusieurs types d'encroûtement:

1) Les *encroûtements non feuilletés*: il y a deux types principaux:

— Les *encroûtements massifs*, d'aspect crayeux ou tuffeux. Ils sont de couleur assez homogène à tendance clair. La structure est généralement massive; elle est cependant parfois polyédrique ou finement feuilletée. La dureté est variable mais en général plutôt faible.

— Les *encroûtements nodulaires*, de couleur également claire mais moins homogène: ils sont essentiellement constitués par des nodules plus ou moins nombreux, pris dans une gangue très calcaire. La structure est à la fois nodulaire et polyédrique et elle peut être finement feuilletée. La dureté et en général assez forte, surtout quand l'encroûtement est très sec.

2) Les *encroûtements feuilletés*: il y a deux types principaux:

— Les *croûtes*, constituées par la superposition de feuillets d'encroûtement durci mais non pétrifié. Les teneurs en calcaire y varient de 60 à plus de 90%. L'épaisseur des feuillets varie de quelques millimètres jusqu'à plusieurs centimètres, et ils ne sont pas continus: ils sont séparés par des fentes subhorizontales, s'anastomosant entre elles. La structure interne des feuillets de croûte rappelle celle des encroûtements non feuilletés: elle peut être massive, nodulaire ou finement feuilletée. Les croûtes sont généralement blanches à blanc crème; les taches noires sont fréquentes. Quand elles sont très dures, elles ont tendance à devenir plus roses.

— Les *dalles compactes*, constituées par un ou plusieurs feuillets de calcaire, extrêmement durs, de couleur gris ou plus souvent saumon, chaque

[Retour au menu](#)
Les principaux types d'horizons Bca

Dénominations des types de répartition et d'individualisation du calcaire dans les horizons Bca		Définitions et descriptions sommaires	Netteté des limites des horizons	Épaisseur des horizons	Couleurs	Dureté des horizons	Teneur en calcaire dans les horizons	Divers
<i>Distribution diffuse</i>		Particules calcaires de dimensions < 1 mm, paraissent distribuées au hasard dans un horizon	<i>Horizons Bca à distribution diffuse avec ou sans pseudo-mycéliums</i>					
Concentrations discontinues	<i>Pseudo-mycéliums</i>	Filaments calcaires soulignant la porosité	Limites très diffuses, souvent non visibles	Quelques dizaines de centimètres	En général plus claires que celles des horizons qui les entourent	Faible	< 40 %	
	<i>Amas friables</i>	Concentrations friables de calcaire, dispersées dans un horizon. Les limites de ces amas sont diffuses ou nettes; les formes et les dimensions sont variées.	Limites diffuses	<i>Horizons Bca à amas friables avec ou sans nodules</i>				
	<i>Nodules</i>	Granules: vol. < 1 cm ³ Nodules s.s. vol. = 1-100 cm ³ . Rogçons vol. > 100 cm ³		Concentrations dures de calcaire, dispersées dans un horizon. Les limites de ces nodules sont nettes: les formes sont variées, souvent sphériques, cylindriques ou coniques, les structures internes sont variées	Quelques dizaines de centimètres	Amas friables: blancs à crème. Nodules: blancs à saumon selon la dureté. Dans les amas et les nodules, inclusions de teinte rouge ou noire. Entre les amas et les nodules: brun ou rubéfié	Faible à moyenne	Horizons à amas friables: < 50 % Horizons à amas et nodules: < 60 %
Concentrations continues - encroûtements	<i>Encroûtements non feuilletés</i>	<i>Encroûtements massifs</i>	Horizons très calcaires, de couleur claire, à structure nodulaire et polyédrique	Limite généralement nette au sommet s'il n'y a pas de croûte, diffuse s'il y en a une. Limite diffuse à la base	<i>Horizons Bca d'encroûtement non feuilleté</i>			
		<i>Encroûtements nodulaires</i>	Horizons très calcaires, de couleur claire, à structure massive ou polyédrique.		Quelques dizaines de centimètres à quelques mètres: le plus souvent 30 à 200 cm	Rose, crème ou blanc; plus ou moins homogène; petites taches noires	Moyenne à forte	> 60 % Augmentation progressive du bas vers le haut
	<i>Encroûtements feuilletés</i>	<i>Croûtes</i>	Horizons très calcaires, à feuillets superposés et discontinue d'encroûtement massif ou nodulaire. Épaisseur des feuillets croissante du bas vers le haut: quelques mm à quelques centimètres.	Limites: nette au sommet, diffuse à la base, diffuse entre la croûte et la dalle	<i>Horizons Bca d'encroûtement feuilleté</i>			
		<i>Dalles compactes</i>	Horizons très calcaires, à feuillets de croûte pétrifiés. Épaisseur des feuillets: quelques centimètres, jusqu'à 20 cm.		Quelques centimètres à plus d'un mètre	Croûte: blanc à blanc-crème, parfois rose; taches noires. Dalle: Gris ou saumon; zones blanches.	Forte à très forte. Augmente du bas vers le haut.	> 70 % Augmentation progressive du bas vers le haut
	<i>Encroûtements lamellaires pellicules rubanées</i>	Feuillets très calcaires à structures finement lamellaire, recouvrant des surfaces dures, calcaires ou non.	Limites nettes	<i>Horizons Bca de pellicule rubanée</i>				
				Quelques millimètres à quelques centimètres	Blanc à saumon. Filet et lamelles sombres.	Très forte.	> 80 %	Se situent au sommet des encroûtements durs, feuilletés ou non. Ils peuvent aussi recouvrir des roches dures peu perméables, en général calcaires, et envelopper des rogçons.

feuillelet pouvant atteindre 10 à 20 cm d'épaisseur. Ces feuillelets, que l'on peut qualifier de pétrifiés, sont généralement très continus, non brisés verticalement comme le sont souvent les croûtes, leur structure interne étant très massive; il n'y a aucune structure finement lamellaire. La teneur en calcaire de ces dalles est fréquemment supérieure à 80%.

3) *Les encroûtements lamellaires ou pellicules rubanées*: ce sont des formations très dures et très calcaires (plus de 70%), dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres. Ces formations sont très nettement stratifiées, constituées par la superposition d'une ou plusieurs séries de lamelles très fines.

La couleur générale de ces pellicules est blanche ou saumon, mais elles présentent toujours plusieurs filets et lamelles plus ou moins sombres, quelquefois bien noirs (matière organique?).

2. LA RÉPARTITION DU CALCAIRE DANS LES SOLS.

La répartition verticale du calcaire permet presque toujours de distinguer, nous l'avons déjà souligné en introduction, trois horizons principaux:

— Un horizon A, calcaire ou non: la distribution du calcaire, quand il est présent, y est toujours diffuse.

— Un horizon Bca: c'est l'horizon diagnostic de ces sols à profil calcaire différencié.

— Un horizon C.

D'après la morphologie des horizons Bca, on peut distinguer trois types principaux de sols:

— *Des sols à profil calcaire peu différencié*: dans l'horizon Bca, de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur, la distribution du calcaire est diffuse, avec parfois des pseudo-mycéliums. Les limites inférieure et supérieure de cet horizon sont très diffuses, difficilement visibles.

— *Des sols à profil calcaire moyennement différencié*: dans l'horizon Bca, de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur, le calcaire est partiellement concentré sous la forme d'amas friables ou de nodules, seuls ou associés. Le niveau à amas ou nodules est généralement surmonté par un niveau où le calcaire s'accumule déjà sous forme diffuse (accumulation diffuse qui se poursuit d'ailleurs dans le niveau à amas ou nodules). A la base de l'horizon Bca, le passage à l'horizon C se fait par un horizon à accumulation diffuse ou par un horizon où le calcaire est concentré mais d'une façon moins dense (et quelquefois différente) que dans l'horizon Bca.

— *Des sols à profil calcaire très différencié*: l'horizon Bca est alors un encroûtement, seul ou associé à d'autres formes d'accumulation. Son

épaisseur peut varier de 10 à plus de 200 cm d'épaisseur. Sa limite supérieure est toujours nette et sa teneur en calcaire, maximum au sommet, décroît en profondeur: à sa base il y a passage progressif à un horizon à amas ou nodules. Cet encroûtement, coiffé ou non par une pellicule rubanée, peut être composé:

- I) d'un encroûtement non feuilleté, seul;
- II) d'une croûte seule (cas rare);
- III) d'une croûte surmontant un encroûtement non feuilleté;
- IV) d'une dalle compacte surmontant une croûte et un encroûtement non feuilleté.

Signalons que certains sols calcaires n'ont pas d'horizons Bca; ce sont:

— soit des sols à profil calcaire non différencié: les teneurs en calcaire sont les mêmes du haut en bas des profils;

— Enfin, il existe aussi, sur roches calcaires, des sols sans profil calcaire, c'est-à-dire non calcaires jusqu'à la roche-mère: tels sont, par exemple, certains sols rouges sur calcaires compacts karstifiés.

a) *Les divers types d'horizons Bca.*

Un horizon Bca est donc presque toujours formé de plusieurs horizons superposés, différents les uns des autres par la morphologie du calcaire, horizons qui sont les suivants:

— *Des horizons à distribution diffuse*, que l'on distingue en général des horizons moins calcaires situés au-dessus ou au-dessous par une teinte plus claire et, assez souvent, par la présence, à certaines périodes de l'année, de pseudo-mycéliums. Cependant, assez souvent, seul le dosage du calcaire permet de déceler leur présence. La teneur en calcaire de ces horizons est variable d'un sol à l'autre.

Elle dépend de la richesse en calcaire des matériaux originels dans lesquels ils se forment; elle n'est pas la même si cette accumulation est la seule présente dans le sol (par exemple: accumulation de calcaire dans des sols à profil calcaire peu différencié) ou si elle annonce des horizons plus riches situés au-dessus ou au-dessous d'elle; elle est aussi variable à l'intérieur de l'horizon lui-même: en général, entre deux limites qu'il est difficile de situer, la teneur en calcaire croît puis décroît régulièrement vers le bas ou vers le haut, quand on ne rapproche d'un horizon plus riche, un encroûtement par exemple. Cependant, le plus souvent, la teneur maximum en calcaire ne dépasse pas 30 à 40%, et c'est surtout dans la fraction texturale limoneuse (2-20 μ) que l'on voit le taux de calcaire augmenter. L'épaisseur de ces horizons à distribution diffuse est variable: quelques dizaines de centimètres en moyenne.

— *Des horizons à amas friables* qui, comme les précédents, peuvent constituer la totalité de l'horizon Bca, ou bien seulement les parties supérieure et inférieure d'une accumulation plus puissante (d'un encroûtement ou d'une croûte par exemple). La densité des amas est très variée et par le jeu de cette densité et de l'accumulation diffuse qui se développe aussi entre les amas, la teneur en calcaire de l'horizon peut présenter les mêmes variations que celles décrites ci-dessus pour les Bca à distribution diffuse. Cependant, la teneur en calcaire total de l'horizon dépasse rarement 50% (les amas eux-mêmes pouvant en contenir jusqu'à 80-90%).

— *Des horizons à nodules* qui contiennent toujours également des amas friables. Les caractères et la position de ces horizons sont à peu près identiques à ceux qui ont été décrits ci-dessus pour les horizons à amas friables. Ils peuvent cependant être plus riches en calcaire: jusqu'à 60%.

— *Des encroûtements non feuilletés*, massifs ou nodulaires. En plus des caractères déjà décrits ci-dessus (S II-A-1-c), on doit, à leur sujet, souligner les faits suivants:

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

2) Quand l'encroûtement non feuilleté n'est pas surmonté par une croûte sa limite supérieure est presque toujours bien tranchée. L'horizon situé au-dessus est alors nettement moins calcaire mais peut contenir des amas friables est des nodules.

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

4) La base des encroûtements est presque toujours peu marquée: il y a passage progressif à des horizons à amas friables ou à nodules. De même, dans une chaîne de sols, les encroûtements non feuilletés peuvent passer latéralement, vers l'aval ou vers l'amont, à des horizons à amas friables ou nodules.

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

— *Des croûtes*, dont les caractéristiques principales, en plus de celles données dans le S II-A-1-c, sont les suivantes:

1) Les feuilletés qui les constituent peuvent être assez épais en surface (plusieurs centimètres), mais ils sont toujours de plus en plus fins quand

on va du haut de l'horizon vers le bas. De même, les fentes qui séparent ces feuillets sont de plus en plus fines quand on va vers la profondeur vers le haut, ces fentes peuvent avoir jusqu'à plusieurs centimètres d'épaisseur et sont alors souvent remplies par de la terre qui provient de l'horizon situé au-dessus de la croûte.

2) La teneur en calcaire et le durcissement de la croûte diminuent toujours de haut en bas. Il peut y avoir plus de 90% de calcaire en surface et souvent le feuillet tout à fait supérieur à partiellement l'aspect de la dalle compacte.

3) Le sommet d'une croûte est, en général, nettement dessiné. Cependant, quand elle n'est pas protégée par une dalle compacte, le feuillet supérieur est souvent disloqué et se mêle à la base de l'horizon situé au-dessus.

4) A la base de la croûte, on trouve généralement un encroûtement non feuilleté, le passage entre les deux horizons étant toujours progressif; c'est l'apparition d'un feuilletage prononcé qui marque la limite entre les horizons, cette limite étant cependant souvent assez difficile à placer d'une façon précise.

5) Latéralement, dans une chaîne de sols, le passage d'une croûte à un encroûtement non feuilleté est également un fait courant.

— *Des dalles compactes* qui, en général, ne sont bien développées qu'au sommet de croûtes calcaires épaisses. Mais il existe souvent des formations intermédiaires entre les croûtes et les dalles compactes: ce sont des feuillets de croûte, durs au sommet comme des dalles compactes; ces feuillets constituent soit le sommet d'une croûte, soit un horizon intermédiaire entre la croûte et la dalle compacte. Les dalles compactes elles-mêmes peuvent être irrégulièrement consolidées, c'est-à-dire qu'elles contiennent, généralement vers la base, des zones à forme de noyaux ou de trainées qui sont encore blanchâtres et assez tendres. Il y a en somme toute une série d'intermédiaires entre les croûtes et les dalles compactes.

— *Des pellicules rubanées* qui se développent au sommet des dalles compactes, des croûtes (quand la dalle compacte n'existe pas), des encroûtements durs non feuilletés (quand il n'y a pas de croûtes), et aussi sur des roches dures peu perméables (il s'agit en général de roche calcaires). Elles apparaissent comme posées sur les surfaces dont elles épousent toutes les irrégularités.

On veut souvent en distinguer deux ou trois niveaux nettement séparés, différents par les couleurs et les stratifications: ce sont des pellicules superposées, qui fréquemment se coupent. Quand elles recouvrent une croûte, ces pellicules tapissent toutes les surfaces supérieures et latérales des morceaux du feuillet supérieur, disloqué, de la croûte; mais elles ne se développent

que très peu ou pas du tout à la base du feuillet. Par ailleurs, quand les fentes sub-horizontales qui séparent les feuillets de croûte sont assez larges, la pellicule rubanée peut venir recouvrir les parois de ces fentes, surtout les parois inférieures (faces supérieures des feuillets de croûte), elle s'introduit également souvent dans les diaclases des roches.

On soulignera en conclusion que, mise à part la pellicule rubanée, les passages verticaux entre les divers types d'horizons Bca sont toujours progressifs (sauf quand il y a polysequum, sujet que je n'aborde pas dans la présente note). Dans un horizon Bca très différencié, on passe ainsi progressivement, du bas vers le haut, d'un horizon à distribution diffuse, à un horizon à amas friables ou nodules, puis à un encroûtement feuilleté, puis à la croûte et enfin à la dalle compacte.

b) *Les variations latérales de l'horizon Bca.*

Au niveau de l'horizon Bca, les passages latéraux progressifs entre les diverses formes d'accumulation et de concentration du calcaire, sont également fréquents. On passe ainsi couramment d'un horizon à amas, à un horizon à nodules; d'un horizon à amas ou nodules à, un encroûtement massifs; d'un encroûtement non feuilleté à une croûte; d'une croûte à la dalle compacte. Et il s'agit bien là de passages latéraux et non de la superposition d'un encroûtement non feuilleté sur un horizon à amas ou nodules, ou de la superposition d'une croûte sur un encroûtement non feuilleté: il y a augmentation progressive de la teneur en calcaire de la partie supérieure du Bca à concentrations discontinues qui se transforme ainsi en encroûtement non feuilleté, puis passage du sommet de cet encroûtement non feuilleté à une croûte qui va s'épaissir et dont les feuillets supérieurs durciront de plus en plus jusqu'à devenir une dalle compacte.

C'est ce qui a été schématisé sur la figure 1. La pellicule rubanée, par contre, vient toujours se superposer, d'une façon discontinue, sur un encroûtement non feuilleté, une croûte ou une dalle.

Les divers types d'horizons Bca sont donc étroitement associés, sans solution de continuité, verticalement dans les sols et latéralement dans les chaînes de sols. Ils résultent du travail continu des mêmes mécanismes.

c) *Rapports entre les horizons A et Bca.*

Selon les régions climatiques, les roches mères et les situations topographiques (voir § III-A), l'épaisseur de l'horizon A varie sensiblement. Le plus souvent, elle est de l'ordre de 30 à 70 cm.

Le passage de cet horizon A à l'horizon Bca, se fait selon des règles assez précises, mises en évidence par des séries d'observations verticales et latérales:

— Dans un sol où l'accumulation du calcaire est diffuse, ou à amas,

ou à nodules, il y a, du haut vers le bas, augmentation progressive de la teneur en calcaire quand on passe d'un horizon à l'autre: on ne peut pas placer de limite précise.

— Quand latéralement, on va vers des Bca plus riches en calcaire, il apparaît que le passage entre les deux horizons, A et Bca, devient de plus en plus net, que l'augmentation du calcaire est de plus en plus rapide, ceci étant dû au fait que c'est surtout au sommet du Bca que la richesse en calcaire s'accroît.

— Quand on arrive aux encroûtements, l'apparition de l'accumulation du calcaire devient brutales: il n'y a plus de transition, le sommet des encroûtements étant toujours très net.

En ce qui concerne maintenant les rapports qui existent entre les teneurs en calcaire et épaisseurs des deux horizons, deux faits importants sont à souligner:

— Il n'y a aucune corrélation entre la teneur en calcaire d'un horizon A et la puissance (épaisseur et richesse en calcaire) d'un horizon Bca. Qu'il s'agisse d'un Bca à amas friables de 30 cm d'épaisseur ou d'un encroûtement de 2 m., l'horizon A peut être non calcaire ou en contenir 20 à 30%.

— De même, il n'y a pas de corrélations systématiques entre l'épaisseur de l'horizon A et la puissance de l'accumulation.

L'ensemble de ces faits, parmi d'autres, démontre que *les horizons A et Bca sont bien ceux d'un même sol*, et non deux dépôts différents; mais ils démontrent aussi que l'accumulation du calcaire n'est pas seulement le résultat d'un lessivage vertical des horizons A: *il y a des apports obliques importants*.

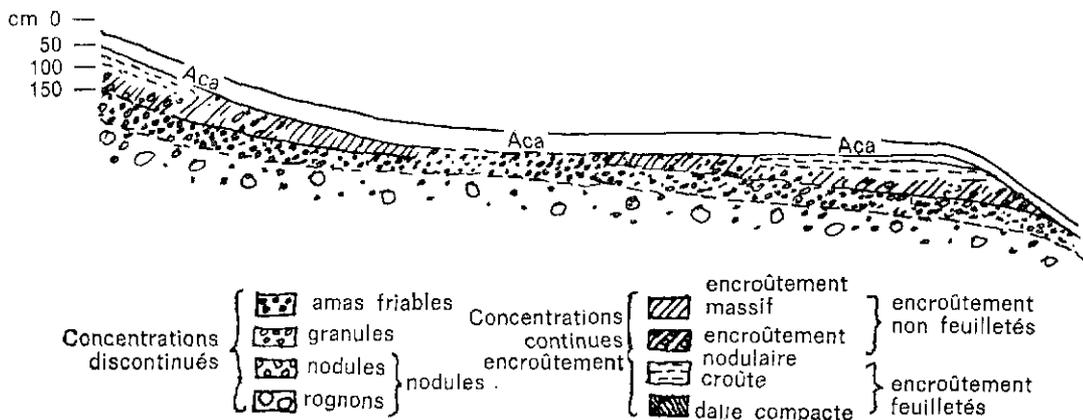


Figure 1 — Passages latéraux entre divers types d'horizons Bca.

d) *Rapports entre les horizons Bca et C.*

On retiendra à ce sujet les faits suivants:

— Quelque soit le type de concentration et d'accumulation du calcaire, il y a toujours passage progressif entre les horizons Bca et C, le calcaire, en général, diminuant graduellement, du haut vers le bas, depuis le maximum de l'accumulation jusqu'au matériau originel. S'il s'agit d'un Bca à amas ou nodules et si l'horizon C contient lui-même du calcaire en concentrations discontinues, la morphologie et la densité de ces concentrations ne sont pas les mêmes dans les deux horizons qui sont séparés par une limite progressive mais distincte. S'il s'agit d'un encroûtement, c'est son sommet qui est le plus riche en calcaire et le plus dur: les encroûtements voient toujours leur teneur en calcaire et leur consolidation diminuer peu à peu vers le bas, et la limite inférieure de ces encroûtements, c'est-à-dire de l'horizon à structure massive ou nodulaire, qui passe à un horizon à amas, ou nodules, est toujours très progressive.

— Il n'y a aucun rapport entre la richesse en calcium ou calcaire du matériau originel ou de la roche-mère et la puissance des accumulations. En particulier tous les types d'accumulation de calcaire peuvent se développer dans des matériaux qui n'étaient pas calcaires (ni calciques) lors de leur mise en place (schistes ou colluvions de schistes par exemple). Cependant la présence d'un bassin versant calcaire ou pour le moins calcique est indispensable. Ceci confirme que le calcaire qui s'accumule dans l'horizon Bca est en grande partie d'origine latérale, après migration oblique dans et sur les sols, de l'amont vers l'aval.

— Le matériau originel a, par sa *texture*, une influence certaine sur les formes que prennent les accumulations de calcaire. En particulier, dans une région climatique donnée, les nodules et les encroûtements nodulaires sont favorisés par les textures grossières. Par ailleurs, les encroûtements très durs sont mieux développés dans les matériaux grossiers (dans et sur les dépôts entièrement caillouteux, il y a souvent un ou plusieurs niveaux de croûte mince et très dure, le reste du dépôt n'étant pas ou étant peu encroûté). Tout ceci n'est pas à traduire en lois absolument systématiques, mais il est certain que sur le terrain on observe souvent que la morphologie des accumulations de calcaire se modifie rapidement en fonction des variations de la texture des matériaux.

L'individualisation et l'accumulation du calcaire, jusqu'à l'encroûtement le plus dur, apparaissent donc bien comme s'étant *formées dans un matériau préexistant*: on ne peut pas, par exemple, imaginer qu'une croûte ou une dalle compacte soit un apport superposé au matériau sous-jacent. *Mais il apparaît aussi que ce n'est pas du matériau originel sous-jacent que provient l'essentiel du calcaire accumulé dans l'horizon Bca.*

3. LES PRINCIPAUX TYPES DE PROFILS CALCAIRES.

En conclusion de cette analyse de la morphologie et de la répartition du calcaire dans les sols à profil calcaire différencié, nous retiendrons ceci:

- a) Il y a quatre types de profils calcaires:
- non différenciés: il n'y a pas d'horizon Bca;
 - peu différenciés: l'horizon Bca est une accumulation à distribution diffuse;
 - moyennement différenciés: l'horizon Bca contient des amas ou nodules;
 - très différenciés: l'horizon Bca est en partie sous la forme d'un encroûtement, sa limite supérieure est toujours nette et sa teneur en calcaire maximum au sommet (60 à plus de 90%).
- b) Dans les quatre cas, l'horizon A peut être calcaire ou non.
- c) Les sols à profil calcaire différencié existent sur roches non calcaires et même sur roches pauvres en calcium.
- d) Les horizons A, Bca et C sont toujours étroitement associés, verticalement dans les sols et latéralement dans les chaînes de sols. L'étude de leur organisation aux différentes échelles démontre que le calcaire qui s'accumule en Bca provient principalement *lessivages obliques*.

B. Le profil textural argileux

La texture des sols à profil calcaire différencié varie considérablement selon les roches-mères: ceci est une évidence sur laquelle je ne m'étendrai pas plus longuement et je me contenterai ici d'évoquer le profil textural argileux de ces sols.

Il est bon tout d'abord se rappeler que l'analyse granulométrique de sols calcaires est une chose difficile et qu'il faut toujours en interpréter les résultats avec beaucoup de prudence. Je rappellerai en particulier que:

- la dispersion d'échantillons calcaires est toujours imparfaite;
- pour étudier le véritable profil textural argileux, il faut travailler sur échantillons décarbonatés;
- pour ne pas endommager les particules les plus fines, il faut décarbonater avec de l'acide très dilué; c'est donc une opération longue.

En fait, l'analyse granulométrique ne peut jamais suffire pour étudier le profil textural d'un sol; l'étude morphologique et surtout micromorphologique est indispensable.

La très grande majorité des sols à profil calcaire différencié possèdent un horizon B *textural*.

Il est caractérisé par un « vente » d'argile, mais ses limites sont presque toujours très diffuses et les vrais revêtements argileux y sont rares ou absents. Au-dessus de cet horizon Bt, les horizons de surface sont plus pauvres en argile que les horizons C.

Le développement de cet horizon Bt et sa position par rapport à l'horizon Bca varie selon les teneurs en calcaire des horizons situés audessus du Bca:

— Dans les sols dont les horizons superficiels sont peu ou non calcaires, le Bt se situe surtout au-dessus et dans la partie supérieure du Bca (le maximum d'argile apparaît avant le maximum de calcaire). Ce Bt est alors souvent fortement argileux (50 % et plus d'éléments inférieurs à 2 microns); l'observation micromorphologique que les cutans y sont fréquents: ces cutans ne se situent cependant que dans le plasma et autour des grains de sable; ils sont généralement absents des pores.

— Dans les sols dont les horizons superficiels sont calcaires, le Bt est en général nettement moins argileux. Il se situe surtout au niveau et plus bas que le Bca (le maximum d'argile apparaît après le maximum calcaire). Les cutans sont rares ou absents.

— Il semble que le lessivage vertical de l'argile joue peu dans la formation des horizons Bt. *Ce sont des B d'altération et l'appauvrissement superficiel résulte principalement d'un entraînement latéral des ions et des particules.* Cet appauvrissement n'est d'ailleurs jamais très important, si on le compare à celui qui se développe dès que la surface du sol n'est plus sursaturée en calcium.

C. Les couleurs

Deux aspects doivent être distingués:

1. LA COLORATION ROUGE: on notera à ce sujet que:

— D'une façon générale, la couleur rouge des horizons A et Bt est d'autant plus accentuée que le sol est moins calcaire et plus argileux.

— La plupart des sols sont plus rouges en profondeur qu'en surface et assez souvent un maximum de rubéfaction est atteint au niveau des horizons B. Il ne faut pas, cependant, exagérer l'importance de ces variations qui sont amplifiées, au moment de l'observation des profils, par les différences d'humidité; les mesures précises font ressortir que les différences sont, en fait, souvent faibles.

2. L'ASSOMBRISSEMENT DES HORIZONS DE SURFACE varie entre 3/3 et 5/6, quel que soit le profil calcaire (nous verrons que cela dépend surtout du climat). On peut distinguer trois types principaux de sols:

— Les sols à horizon supérieur sombre: valeur et chroma du sol humide sont inférieurs à 3,5/3,5 dans les vingt premiers centimètres; ce sont les couleurs de l'épipédon mollique.

— Les sols à horizon supérieur clair.

— Les sols à horizon supérieur très clair: valeur et chroma du sol humide sont supérieurs à 4/4.

En profondeur, il y a toujours éclaircissement des couleurs, qui s'accroît quand le calcaire augmente. Dans les sols où l'horizon Bca prend de l'importance, l'éclaircissement est maximum à ce niveau.

D. Le profil structural

Après le calcaire, la texture et la couleur, la structure permet de préciser l'organisation des divers types de sols et les limites entre certains horizons.

L'essentiel peut être résumé en détaillant le profil structural de deux types de sols à profil calcaire moyennement différencié:

— les sols à horizons de surface argileux, non ou peu calcaires sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres;

— les sols fortement calcaires dès la surface et moins argileux.

1. LES SOLS NON CALCAIRES EN SURFACE.

Quatre horizons structuraux peuvent être distingués (les structures décrites sont celles de sols cultivés ou pâturés intensivement, mais non irrigués):

a) En surface, sur les 20 à 30 premiers centimètres, la structure, quand le sol n'est pas trop sec, est polyédrique à nuciforme assez grossière (30 à 60 mm), la sous-structure, d'autant plus visible que le sol est plus humide, étant grumeleuse (parfois même grenue dans les sols dont les horizons supérieurs sont sombres). A l'état sec, trois cas sont possibles:

— La structure s'élargit et devient plus anguleuse; les éléments structuraux deviennent durs et compacts; il n'y a presque plus de sous-structure grumeleuse visible. Une structure lamellaire peut se développer tout à fait superficiellement.

— La structure reste polyédrique à nuciforme avec une sous-structure grumeleuse à tendance grenue bien développée. Il n'y a pas de structure lamellaire en surface. Ce cas est celui des horizons à couleur sombre (3,5/3,5).

— La structure reste polyédrique à nuciforme mais la sous-structure fine est moins bien développée, et la structure lamellaire de surface prend de l'importance: pellicule de croûte superficielle pouvant dépasser 1 cm d'épaisseur. Ce cas est celui d'horizons où le calcaire n'est plus totalement absent, et dont la couleur est claire.

b) Le deuxième horizon, dans lequel le calcaire reste absent, à 20-50 cm d'épaisseur: c'est l'horizon Bt.

— A l'état humide, sa structure est plus fine et plus anguleuse que celle de l'horizon précédent: c'est une structure polyédrique fine, très anguleuse, à facettes très lissées; assez souvent, les agrégats sont un peu aplatis prenant l'aspect de petites écailles.

— A l'état sec, cet horizon est souvent caractérisé par le développement d'une belle structure prismatique. Cette structure n'est cependant vraiment typique que dans les sols fortement argileux (plus de 50% d'éléments inférieurs à 2 microns) et non calcaires. En l'absence de l'une de ces deux conditions, la structure prismatique n'existe pas et la structure polyédrique est à la fois moins fine, moins anguleuse et moins luisante.

c) Le troisième horizon est celui de l'accumulation du calcaire: c'est le Bca. Sa structure est polyédrique moyenne à fine, les agrégats étant d'autant plus soudés entre eux que le milieu est plus calcaire. La surface des agrégats est souvent lissée, mais nettement moins brillante que dans l'horizon précédent. A l'état sec, la structure prismatique de l'horizon Bt peut se poursuivre au sommet de l'horizon Bca sur quelques centimètres d'épaisseur.

d) Vient enfin l'horizon C dont la structure varie selon les matériaux originels.

2. LES SOLS CALCAIRES DÈS LA SURFACE.

Le profil structural est le suivant:

a) Comme dans les sols non calcaires, la structure des 10 à 20 premiers centimètres varie en même temps que la couleur et la teneur en calcaire, même plus nettement encore:

— Dans les horizons sombres, la structure est bien développée, polyédrique à nuciforme assez large (éléments de 3-5 cm) avec une sous-structure grumeleuse à grenue assez nette.

En surface, la structure lamellaire est très réduite.

— Dans les horizons clairs, la structure polyédrique à nuciforme est moins bien développée; la sous-structure grenue est absente et la sous-structure grumeleuse est d'autant plus mal développée que l'horizon est plus clair et plus calcaire. En surface, un horizon à structure lamellaire de quelques centimètres d'épaisseur se développe d'autant mieux que l'horizon est plus clair et plus calcaire.

— Dans les horizons très clairs, la structure polyédrique à nuciforme et la sous-structure grumeleuse sont mal développées, la cohésion des agrégats est faible. En surface, l'horizon à structure lamellaire peut atteindre 1 à 2 cm d'épaisseur: c'est une croûte superficielle très accentuée.

b) Plus profondément, la structure devient progressivement plus fine et plus anguleuse. Quand on atteint l'horizon Bca elle est polyédrique moyenne à fine, et bien développée dans tous les types de sols. Souvent, cette structure polyédrique est déjà bien formée nettement au-dessus de l'apparition de l'individualisation du calcaire: on peut considérer qu'elle indique alors que l'on a déjà atteint l'horizon B, Bca et Bt dont la structure permet donc de mieux tracer la limite supérieure.

c) Dans l'horizon Bca, cette structure se maintient, et même se développe si, parallèlement, la teneur en argile devient importante. Souvent c'est alors une structure polyédro-cubique qui se différencie, structure moyenne à fine, dont les agrégats bien individualisés, présentent des facettes lissées, assez brillantes, souvent distordues, concaves ou convexes. Ces éléments sont d'autant mieux soudés entre eux que le niveau est plus calcaire.

d) Vient enfin l'horizon C dont la structure varie selon les matériaux originels.

Ajoutons pour terminer, que dans l'ensemble de ces sols calcaires ou non en surface:

- la porosité, fine et grossière, est toujours bonne;
- la stabilité structurale est en général faible, sauf dans les horizons de surface de couleur sombre.

E. Conclusion: les principaux types de sols

Résumons en conclusion quels sont, d'après les caractères morphologiques essentiels que nous avons étudiés dans les pages précédentes, les principaux types de ces sols qui contiennent de calcaire dans un ou plusieurs de leurs horizons et que je dénomme: sols à profil calcaire différencié.

1. LES SOLS À PROFIL CALCAIRE MOYENNEMENT DIFFÉRENCIÉ.

Dans l'horizon Bca de ces sols, le calcaire est partiellement concentré sous la forme d'amas friables ou de nodules, seuls ou associés. La teneur en calcaire y atteint 30 à 60% selon les cas.

On en distingue deux types principaux:

a) *Les sols non ou peu calcaires dans les horizons superficiels.* L'horizon est en général assez bien développé, le maximum d'argile se situant au-dessus du maximum calcaire. D'après la couleur et la structure de l'horizon A, on peut distinguer:

— *des sols à horizon supérieur sombre* (épipedon mollique): valeur et chroma du sol humide sont inférieurs à 3,5/3,5; structure (polyédrique à nuciforme) et sous-structure (grumeleuse à grenue) sont bien développées et à bonne stabilité structurale;

— *des sols à horizon supérieur clair*: valeur et chroma du sol humide sont compris entre 3,5/3,5 et 4,4; structure (polyédrique à nuciforme) et sous-structure (grumeleuse) sont moins bien développées, plus anguleuses et plus grossière;

— *des sols à horizon supérieur très clair*: valeur et chroma du sol humide sont supérieurs à 4/4; une croûte lamellaire fine (quelques millimètres) apparaît en surface.

b) *Les sols calcaires dès la surface.* L'horizon Bt de ces sols est en général moins bien développés: il se confond en grande partie avec le Bca. D'après la couleur et la structure de l'horizon A, on distingue également:

— *des sols à horizon supérieur sombre*: les caractéristiques de couleur et structure sont à peu près les mêmes que dans les sols non calcaires en surface;

— *des sols à horizon supérieur clair*: les structures sont moins bien développées et une croûte lamellaire apparaît en surface; la sous-structure grenue est rare;

— *des sols à horizon supérieur très clair*: les structures sont mal développées et la cohésion des agrégats est faible; la croûte lamellaire de surface est épaisse (jusqu'à 1-2 cm).

2. LES SOLS À PROFIL CALCAIRE PEU DIFFÉRENCIÉ.

Dans l'horizon Bca de ces sols, la distribution du calcaire est diffuse, avec parfois des pseudo-mycéliums. La teneur en calcaire y atteint 10 à 40% selon les cas.

D'après les teneurs en calcaire, les couleurs et les structures des horizons superficiels, on distingue parmi ces sols les mêmes que ceux cités pour les sols à profil calcaire moyennement différencié.

3. LES SOLS À PROFIL CALCAIRE TRÈS DIFFÉRENCIÉ.

L'horizon Bca de ces sols est un encroûtement, seul ou associé à d'autres formes d'accumulation. La teneur en calcaire peut y dépasser 90%. Il peut s'agir de:

- *sols à encroûtement non feuilleté*, massif ou nodulaire;
- *sols à dalle compacte* (dalle, sur croûte, sur encroûtement non feuilleté).

D'après la teneur en calcaire, les couleurs et les structures des horizons superficiels, on distingue parmi ces sols les mêmes types que ceux cités pour les sols à profil calcaire moyennement différencié.

Ajoutons enfin, qu'au sein de tous ces types de sols, toutes sortes de catégories peuvent être encore distinguées, en particulier en fonction:

- de la rubéfaction des horizons A et Bt;
- de la texture des horizons Bt et Bca;
- de l'appauvrissement des horizons A;
- enfin d'autres caractères que nous n'évoquons pas dans cet article: profil organique, salure, alcalisation; minéraux argileux, état du fer, etc.

III. LA RÉPARTITION DES SOLS.

La répartition des sols à profil calcaire différencié, c'est-à-dire les variations de leurs principaux caractères morphologiques, décrits dans les pages précédentes, sont fonction, pour l'essentiel:

- des roches-mères;
- des climats;
- des reliefs;
- de l'âge des sols;
- de l'action de l'homme.

A. Le profil calcaire

On peut résumer l'essentiel en disant que:

1. *Les horizons Bca sont toujours d'autant mieux différenciés que les sols sont plus anciens*: il y a accentuation progressive de l'accumulation du calcaire en fonction du temps. Ceci est particulièrement net dans les plaines alluviales et colluviales: les profils calcaires des sols sont d'autant plus différenciés que ces sols sont sur des dépôts et des surfaces géomorphologique plus anciens (fig. 2). *En revanche, la décarbonatation de l'horizon A ne*

s'accroît pas avec l'âge: ce n'est que sur les surfaces les plus jeunes, du Quaternaire récent, que l'on constate une légère décarbonatation (variable selon les matériaux originels et les climats) en fonction de l'âge de ces surfaces; mais cette décarbonatation ne s'accroît pas sur les surfaces plus anciennes, et quand les encroûtements apparaissent il y a même souvent réaugmentation des teneurs en calcaire dans les horizons A. On peut en conclure:

— que le lessivage vertical des carbonates, qui appauvrit l'horizon A au profit de l'horizon Bca, est un phénomène assez limité;

— que l'essentiel du calcaire qui s'accumule en Bca ne provient donc pas de la décarbonatation de l'horizon A situé au-dessus de lui; *l'importance des apports obliques est ainsi confirmée*;

— que dans les sols à profil calcaire très différencié, l'horizon A se recalcaire sous l'influence de l'encroûtement qui se développe dessous, probablement par bioturbation.

2. *Sur un versant*, il y a général, de l'amont vers l'aval:

— augmentation de la différenciation de l'horizon Bca: c'est le résultat du lessivage oblique;

— augmentation de l'épaisseur des horizons A: c'est principalement le résultat d'une légère érosion superficielle.

3. *Les horizons A* sont d'autant moins calcaires et les Bca d'autant plus profonds que les roches-mères calcaires sont d'altération plus difficile, ou

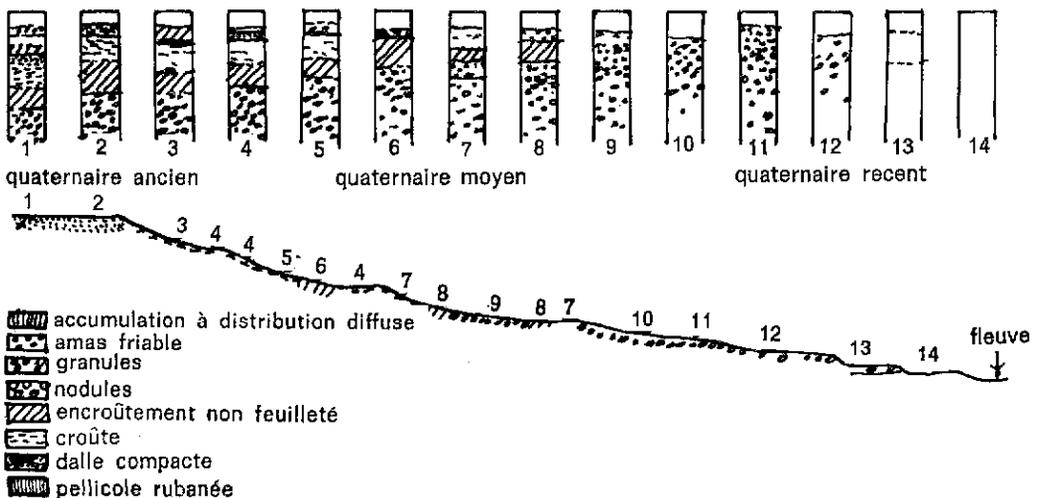


Figure 2 — Morphologie de l'horizon BCA dans les sols situés sur les terrasses quaternaires d'un fleuve. (Longueur de la coupe: quelques centaines de mètres; différence d'altitude entre les points 1 et 14: quelques dizaines de mètres).

qu'elles sont plus perméables ou encore, bien sûr, qu'elles sont moins calcaires. Par ailleurs, pour des conditions de roches et relief identiques, la décarbonatation superficielle augmente également quand on va des régions arides vers les régions humides. Il y a donc *variation du lessivage vertical des carbonates en fonction des climats et surtout en fonction des roches-mères*. Ce lessivage vertical détermine d'une part la teneur en calcaire minimum que peut atteindre l'horizon A, d'autre part la profondeur à laquelle les carbonates qui viennent latéralement de l'amont vont s'accumuler pour former l'horizon Bca.

4. Les horizons Bca se modifient assez peu en fonction des climats, et ceci depuis les régions désertiques jusqu'aux régions à climat méditerranéen subhumide ou tropical sahélo soudanien. On note seulement que:

— dans les sols jeunes, les horizons Bca sont d'autant mieux différenciés que le climat est plus humide: *il y a une accélération mécanismes quand on va de l'aride vers l'humide;*

— dans les sols plus anciens, à profil calcaire très différencié, les encroûtements feuilletés et durcis sont mieux développés dans les zones arides et semi-arides que dans les zones sub-humides où les encroûtements non feuilletés et peu consolidés prédominent; *les formes durcies et feuilletées sont en effet favorisées par des variations d'humidité importantes et rapides.*

Par ailleurs, j'ai déjà souligné (§ II-A-2-d) que *l'épaisseur et la teneur en calcaire des horizons Bca sont assez indépendantes des matériaux sous-jacents*. Cependant, quand on étudie, dans les diverses régions climatiques, l'accumulation du calcaire dans les matériaux pauvres en calcium, on constate des variations significatives:

— En profondeur, dans ce que l'on peut appeler l'horizon C, on retrouve du calcaire d'autant plus profondément et à des distances d'autant plus grandes de l'amont calcaire que le climat est moins aride.

— Par contre, au niveau des horizons A et surtout Bca, la pollution des sols par les carbonates se fait jusqu'à des distances d'autant plus grandes de l'amont calcaire ou calcique que le milieu est plus aride ou encore que les matériaux sont moins perméables. Ceci peut paraître à première vue curieux. Il suffit cependant, pour l'expliquer, de se souvenir que le lessivage vertical des carbonates diminue quand le drainage est le plus en plus limité; des carbonates sont donc de plus en plus difficilement éliminés des sols et le long d'une pente, ils peuvent alors être dissous, transportés latéralement et reprécipités dans les sols à plusieurs reprises: leur migration, bien que probablement plus lente quand le climat s'aridifie ou quand la perméabilité du milieu diminue, peut ainsi être, par étapes successives, de plus en plus lointaine.

5. Citons quelques exemples de variation des profils calcaires en fonction des roches et des climats méditerranéens (¹).

a) *Sur calcaire et dolomies compacts:*

— Les phénomènes karstiques existent dès les zones sahariennes. Dans les poches karstiques, les sols sont à profil calcaire moyennement différencié: horizon Bca à amas friables et nodules; les encroûtements sont rares, sauf les pellicules des croûtes et les pellicules rubanées qui collent à la roche. L'horizon A reste toujours calcaire.

— Les sols à horizon A non ou peu calcaires apparaissent dans les régions qui sont à la limite de l'aride et du semi-aride.

— Les sols à horizon A épais et non calcaire se généralisent dans les régions semi-arides et subhumides. Dans l'horizon Bca, les concentrations en nodules se développent on atteint souvent le stade de l'encroûtement nodulaire, mais les croûtes sont rares. La profondeur moyenne du sommet de cette accumulation augmente quand on va du semi-aride vers le subhumide et l'humide. Dans les régions humides, les sols rouges entièrement décarbonatés, sans horizon Bca, se généralisent.

b) *Sur marnes*, les profils calcaires varient beaucoup en fonctions des types pétrographiques (dureté, teneur en calcaire, texture) et des situations topographiques; de ce fait, il est plus difficile de faire ressortir les zonalités climatiques. Ces zonalités existent cependant:

— Les sols à profil calcaire différencié ou très différencié existent dès les zones désertiques; étant donné la vigueur de l'érosion, ils sont cependant assez rares.

— Les encroûtements calcaires sont fréquents dans les zones arides et semi-arides; mais le durcissement diminue quand on va vers l'humide. Dans les régions subhumides et humides, les horizons Bca sont le plus souvent à gros amas calcaires; les encroûtements non feuilletés et surtout les croûtes sont rares.

— Dans les régions semi-arides, des sols à horizon A non calcaire peuvent exister sur les roches assez rares, peu argileuses ou peu calcaires. Mais ces sols ne se généralisent sur des marnes plus tendres, plus calcaires ou plus argileuses que dans les régions subhumides et humides.

(¹) Les étages bioclimatiques cités sont ceux définis par EMBERGER (1955) d'après le quotient pluviothermique. Les correspondances approximatives entre ces étages bioclimatiques et les précipitations moyennes annuelles des pluies sont les suivantes:

- humide: plus de 900-1 000 mm
- subhumide: 500-700 à 900-1 000 mm
- semi-aride: 300-400 à 500-700 mm
- aride: 150-180 à 300-400 mm
- saharien ou désertique: moins de 150-180.

c) *Certains grès calcaires* très durs se comportent comme des calcaires et dolomies compacts: la zonalité climatique des profils calcaires y est comparable; la décarbonatation profonde des sols, la disparition de tout horizon Bca des poches karstiques se font cependant à partir de régions plus arides.

Sur les autres grès, moins consolidés, les horizons A non calcaires n'apparaissent qu'à partir de zones nettement semi-arides. Par ailleurs, les encroûtements se forment facilement dans ces grès, dans presque toutes les zones climatiques: c'est en particulier un milieu très favorable aux croûtes. Les encroûtements disparaissent cependant dans les milieux trop humides, au-delà de 650 mm environ. Il est enfin intéressant de noter que les divers types d'horizons Bca sont toujours moins calcaires dans les sols développées sur grès quartzeux ou quartzo-calcaires que dans les sols développés sur d'autres roches. Ceci provient de la forte proportion de sables quartzeux qui y restent inclus. Par exemple en encroûtement massif typique peut n'avoir que 40% de CO_3Ca .

d) *Sur les roches non calcaires mais riches en calcium* (basaltes, certains granites, etc.) les sols à profil calcaire moyennement ou très différencié, à l'horizon A calcaire ou non, sont fréquents dans les pays sahariens et arides. Ils disparaissent rapidement dès que l'on aborde les zones semi-arides, à moins de se trouver à proximité d'une source de calcaire.

e) *Sur alluvions et colluvions* les variations sont celles que j'ai résumées dans les § 1., 2., 3., et 4 ci-dessus.

6. *L'homme* modifie les profils calcaires:

— En défrichant, il provoque l'érosion; les horizons A diminuent d'épaisseur, les horizons Bca se rapprochent de la surface.

— En labourant, il remonte du calcaire: il y a recarbonatation des horizons superficiels.

7. *En conclusion* l'essentiel à retenir est le suivant:

— Tous les aspects des profils calcaires varient surtout en fonction des roches et des matériaux: ceux dans et sur lesquels les sols sont aujourd'hui situés, mais aussi tous ceux que l'on trouve dans les paysages d'amont. Les caractères de ces roches et matériaux qui influencent les profils calcaires sont surtout ceux qui règlent la vitesse d'altération des roches, la richesse en calcaire et en calcium, la texture et la perméabilité avant et pendant l'altération. Il faut en particulier souligner que les sols à profil calcaire n'existent sur les matériaux non calcaires que s'il y a des roches calcaires ou riches en calcium dans les bassins versants qui les dominent: l'importance des apports éoliens paraît limitée, même dans les régions les plus arides.

— Partout où les études géologiques et géomorphologiques du Quaternaire permettent de distinguer des dépôts et des formes d'âges différents, on constate, d'une part, que les horizons Bca sont d'autant plus développées que les surfaces où on les trouve sont plus anciennes, d'autre part, que hormis les sols sur dépôts récents, les horizons A ne se modifient pas avec l'âge des surfaces.

— L'importance de la différenciation des profils calcaires semble donc surtout liée à l'âge des sols et il est vrai que des sols à profils calcaires peu différenciés, moyennement différencié et très différencié existent dans toutes les zones climatiques. Le développement et la morphologie des profils calcaires ne sont cependant pas indifférents aux climats actuels:

I) les sols calcaires sont d'autant plus fréquents que le pays est plus aride et il faut en particulier souligner que l'influence d'un amont calcaire pour le développement de sols à profil calcaire sur des matériaux non calcaires se fera sentir d'autant plus loin que le climat est plus aride;

II) la morphologie, la puissance et la profondeur des horizons Bca se modifient avec les climats: l'épanouissement des encroûtements calcaires feuilletés dans les zones arides en est l'exemple le plus frappant;

III) mais c'est, en fait, surtout l'horizon A, insensible au vieillissement, qui se modifie parallèlement aux climats: dans des conditions identiques de roches-mères et de relief, on constate toujours que son épaisseur augmente et que sa teneur en calcaire diminue quand on s'éloigne des régions arides.

B. Les autres caractères

J'analyse les variations des autres caractères beaucoup plus brièvement: les phénomènes sont d'ailleurs plus simples.

1. LE PROFIL TEXTURAL ARGILEUX.

L'horizon B textural se développe progressivement en fonction du temps, parallèlement à la différenciation du profil calcaire. Cependant, le développement maximum de cet horizon Bt est atteint assez rapidement, en quelques milliers d'années, et il ne s'accroît plus dès que le Bca devient un encroûtement.

Par ailleurs, dans les sols ayant un certain âge, la différenciation texturale, qui s'exprime par la présence en surface d'un horizon plus pauvre en argile que l'horizon C et en profondeur d'un horizon B+ au contraire plus riche, est un phénomène généralisé dans toutes les régions climatiques, jusque dans les zones désertiques, cette différenciation texturale étant d'autant plus accen-

tuée que les sols, et en particulier leurs horizons de surface, sont moins calcaires (d'où l'influence des roches-mères).

L'homme, défrichant et en cultivant, accentue l'appauvrissement des horizons de surface: c'est une conséquence de la destruction des matières organiques et des structures.

2. LA COLORATION ROUGE.

La coloration rouge se modifie surtout en fonction des roches et des climats:

— Sur calcaires et dolomies compacts, la rubéfaction se développe parallèlement à la décarbonatation; les couleurs inférieures à 5 YR apparaissent dans des régions qui sont à la limite de l'aride et du semi-aride et se généralisent dans les zones semi-arides. En allant vers des zones plus humides, on voit les sols rouges s'associer progressivement à des sols bruns (5 et 7,5 YR).

— Sur les marnes, la coloration rouge, inférieure à 5 YR, ne se développe jamais (à moins que la marne soit elle-même rubéfiée: Trias et crétacé par exemple).

— Entre les calcaires compacts et les marnes, les faciès intermédiaires sont nombreux, et la rubéfaction des sols en dépend. Dans l'ensemble, cette rubéfaction semble d'autant plus facile que l'altération de la roche est plus lente et le milieu plus drainant.

— Sur les grès calcaires, la rubéfaction se développe à peu près comme sur les calcaires et dolomies compacts. Elle se manifeste dans des milieux d'autant plus arides que l'altération de la roche est plus lente.

— Sur les granites, la rubéfaction est liée à l'aridité: elle est souvent très nette dans les régions sahariennes, sur les surfaces du Quaternaire moyen et ancien. Elle disparaît dès que le climat ne permet plus, sur ces roches, une saturation des sols en calcium.

— Sur les basaltes, le domaine des sols rouges est assez limité: en milieu aride, les sols sont calcaires et la couleur ne descend pas au-dessous de 5 YR; en milieu subhumide ou mal drainé, les phénomènes andiques ou vertiques favorisent la brunification et le noircissement; ce n'est en somme que dans les domaines semi-arides que la rubéfaction est bien développée sur les roches basaltiques.

— Les roches rouges ne manquent pas en régions méditerranéennes: argilites, grès, marnes, etc.; Trias, Crétacé, Tertiaire. La zonalité climatique de la rubéfaction des sols est donc souvent faussée.

— Sur les alluvions et colluvions fini-tertiaires et quaternaires, la rubéfaction des sols est essentiellement liée à l'origine des matériaux; ces

matériaux proviennent de l'érosion de roches et des sols plus ou moins rouges, et les sols en épousent la couleur; les phénomènes rubéfaction après mise en place des dépôts semblent limités.

La coloration rouge des sols à profil calcaire différencié est donc possible dans toutes les régions climatiques méditerranéennes. Il apparaît cependant nettement que le domaine « idéal » de la rubéfaction se situe en région semi-aride: à part des marnes, toutes les roches peuvent y porter des sols rouges, à couleur inférieure à 5 YR. Quand on se dirige vers l'aride, cette rubéfaction se fait rare sur les roches trop riches en calcium; quand on va vers l'humide, ce sont au contraire les sols pauvres en calcium qui sont de moins en moins souvent rubéfiés.

3. LA COULEUR ET LA STRUCTURE DES HORIZONS DE SURFACE

a) Couleurs et structures des horizons de surface varient surtout en fonction des zones climatiques. On peut distinguer quatre domaines (en région méditerranéenne):

— Le domaine des sols à horizon supérieur sombre (épipedon mollique) (voir § II-C-2, II-D et II-E-1 pour la description des horizons): ce domaine se situe à peu près entre 400 et 800 mm de précipitations moyennes; il correspond donc à la majeure partie des zones semi-arides et subhumides (voir note intra-paginale p. 28). En fait les limites varient un peu en fonction des roches-mères.

— Le domaine des sols à horizon supérieur clair: il se situe à peu près entre 400 et 300 mm.

— Le domaine des sols à horizon supérieur très clair: c'est celui des pays arides et désertiques.

— Enfin le domaine humide, de haute montagne, où les horizons supérieurs, s'ils ne sont pas calcaires, s'éclaircissent; ceci est lié à une certaine désaturation du complexe absorbant: les horizons de surface ne sont pas sursaturés en calcium. Dans le domaine des sols à horizon supérieur sombre, cet éclaircissement se produit également à chaque fois que l'on passe des sols calcaires ou sursaturés en calcium dès la surface, à des sols déficitaires en calcium: ceci s'accompagne, par rapport aux sols calcaires ou saturés, d'une accentuation du lessivage des argiles et d'une dégradation de la structure.

b) Les sols à profil calcaire différencié sont souvent associés à des sols vertiques, calcaires ou non, que je n'ai pas traités dans le présent article (voir § I). Je préciserai seulement ici que le passage latéral à des sols vertiques s'accompagne toujours d'un assombrissement de la couleur et d'un élargissement de la structure qui devient également plus anguleuse.

c) La plupart des sols des pays du pourtour de la Méditerranée, sont défrichés, cultivés et pâturés de longue date. Quand on compare ces sols à ceux des zones qui ont été protégées, on est frappé par les différences, différences qui marquent presque toujours une *profonde dégradation de la fertilité des sols*: fortes diminutions des taux de matière organique, éclaircissement des horizons de surface, dégradation des structures superficielles, développement des croûtes lamellaires superficielles; et à ceci s'ajoutent l'emprise de l'érosion, la recarbonatation des horizons de surface, l'appauvrissement de ces horizons en éléments fins. Ces dégradations sont d'autant plus nettes et, probablement, irréversibles que l'on se trouve dans des milieux plus arides: la végétation naturelle y témoignait en effet de conditions climatiques passées plus humides; l'équilibre était précaire: la destruction de cette végétation a rompu cet équilibre. Quand à l'irrigation, si elle est mal conduite, ce qui est fréquent, elle n'arrange rien; c'est un sujet que j'ai longuement étudié au Maroc, mais cela sort du cadre du présent article.

4. SALURE ET ALCALISATION DES SOLS.

Je me contente d'effleurer ce sujet pour souligner que, dans les régions arides et désertiques, les sols calcaires sont également souvent salés et alcalisés:

- salure essentiellement gypseuse et chloro-sodique;
- alcalisation principalement sodique, mais également souvent liée à la présence de magnésium, sur le complexe absorbant ou sous la forme de carbonate de magnésium actif qui peut être responsable de pH très élevés: 9,5 et plus.

IV. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Les sols calcaires des régions méditerranéennes et désertiques sont, pour la plupart, des *sols à profil calcaire différencié*, caractérisés par la présence, dans la partie moyenne du sol, d'un horizon Bca d'accumulation du calcaire.

Dans cet horizon Bca, la distribution du calcaire peut être, selon les cas, diffuse, en concentrations discontinues (pseudo-mycéliums, amas friables, nodules), en concentrations continues (encroûtements non feuilletés, massifs ou nodulaires; encroûtements feuilletés: ce sont des croûtes ou des dalles compactes; encroûtements lamellaires: ce sont des pellicules rubanées).

D'après la morphologie de l'horizon Bca, on distingue:

- des sols à profil calcaire non différencié: il n'y a pas d'horizon Bca;
- des sols à profil calcaire moyennement différencié: l'horizon Bca contient des amas ou nodules;

— des sols à profil calcaire très différencié: l'horizon Bca est en partie sous la forme d'un encroûtement.

Dans tous ces sols, l'horizon A peut être ou non: il n'y a aucune corrélation entre la teneur en calcaire (et l'épaisseur) d'un horizon A et la puissance (épaisseur et richesse en calcaire) d'un horizon Bca. Par ailleurs, il n'y a aucun rapport entre la richesse des horizons Bca: en particulier, tous les types d'accumulation de calcaire souvent se développer dans des matériaux qui ne sont ni calcaires, ni calciques; la présence d'un bassin versant, c'est-à-dire d'un amont, calcaire ou pour le moins calcique est cependant indispensable. Les horizons A, Bca et C sont toujours étroitement associés, verticalement dans les sols et latéralement dans les chaînes de sols: l'étude de leur organisation aux différentes échelles et les observations résumées ci-dessus démontrent cependant que le calcaire qui s'accumule en Bca provient principalement de lessivages obliques.

La plupart de ces sols calcaires possèdent un *horizon B textural*; assez peu différencié. Le lessivage de l'argile joue peu dans la formation de cet horizon qui est principalement un B d'altération.

La coloration rouge de ces sols est d'autant plus accentuée que le sol est moins calcaire et plus argileux.

D'après *la couleur et la structure des horizons de surface*, on distingue, quel que soit le profil calcaire:

— des sols à horizon supérieur sombre (épipedon mollique): valeur et chroma du sol humide sont inférieurs à 3,5/3,5; structure (polyédrique à nuciforme) et sous-structure (grumeleuse à grenue) sont bien développés et à bonne stabilité structurale;

— des sols à horizon supérieur clair: valeur et chroma du sol humide sont compris entre 3,5/3 et 4/4; les structures sont moins bien développées, plus grossières, moins stables; une croûte lamellaire apparaît en surface;

— des sols à horizon supérieur très clair: valeur et chroma du sol humide sont inférieurs à 4/4; les structures sont mal développées; la cohésion des agrégats est faible; la croûte lamellaire de surface est épaisse (jusqu'à 1-2 cm).

La différenciation du profil calcaire (morphologie et puissance de l'horizon Bca) varie principalement en fonction de *l'âge des sols*: cette différenciation s'accroît progressivement en fonction du temps. Elle se modifie par contre assez peu en fonction des *climats* (depuis le subhumide méditerranéen jusqu'au désert) et des *roches*. En revanche, la teneur en calcaire des horizons A varie sensiblement en fonction des roches et des climats, mais assez peu en fonction de l'âge des sols: ces horizons sont d'autant moins calcaires et plus épais que les roches-mères calcaires sont d'altération plus difficile, ou

qu'elles sont plus perméables ou encore, bien sûr, qu'elles sont moins calcaires; par ailleurs, dans des conditions identiques de roches-mères et de relief, la décarbonatation superficielle augmente également quand on va des régions arides vers les régions humides.

Enfin, la répartition des types de sols en fonction des roches, climats et reliefs confirme l'importance de la *migration latérale* des carbonates sur et dans les sols.

La différenciation du profil textural argileux, pour les sols ayant un certain âge, existe dans toutes les régions climatiques, jusqu'au Sahara. Cette différenciation est d'autant plus accentuée que les sols, et en particulier leurs horizons de surface, sont moins calcaires (d'où l'influence des roches-mères).

La coloration rouge est principalement en fonction de la décarbonatation des horizons de surface de la couleur des roches-mères: elle se modifie donc surtout en fonction des roches et des climats.

La couleur plus ou moins sombre des horizons de surface et de la structure de ces horizons (forme et stabilité) se modifient en fonction des zones climatiques: mis à part le domaine montagneux et humide, quand on va de subhumide méditerranéen vers l'aride, les couleurs s'éclaircissent, les structures deviennent moins développées, plus grossières, moins stables, les croûtes lamellaires de surface se développent.

Le défrichement, le pâturage, la culture (en sec et en irrigué) de ces sols provoquent presque toujours une *profonde dégradation de leur fertilité*: appauvrissement en matières organiques, dégradation des structures superficielles, développement des croûtes lamellaires de surface, érosion, recarbonatation des horizons de surface, appauvrissement de ces horizons en éléments fins.

Dans les régions arides et désertiques, les sols calcaires sont fréquemment salés et alcalisés.

ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT QUELQUES OUVRAGES ET TRAVAUX RECENTS

- ARISTARAIN, L. F., 1971 - *On the definition of caliche deposits*. Zeitschrift für Geomorphologie, 15, 3, pp. 274-289.
- AUBERT, G. et BOULAINÉ, J., 1967 - *La pédologie*. P.U.F., Paris, 126 p.
- BURINGH, P., 1968 - *Introduction to the study of soils in tropical and subtropical region*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 118 p.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 1967 - *Classification des sols*. Lab. de Péd. Géol. de l'E.N.S.A. de Grignon, multigr.; 87 p.
- DUCHAUFOUR, P., 1970 - *Précis de pédologie*. 3ème édition, Masson, Paris, 481 p.
- DUDAL, R., 1968 - *Definition of soil units for the soil map of the world*. FAO-UNESCO, multigr., 72 p.

- DUTIL, P., 1971 - *Contribution à l'étude des sols et des palésols du Sahara*. Université de Strasbourg, multigr., 346 p.
- FOURNET, A., 1969 - *Étude pédologique de la dorsale tunisienne*. Université de Paris, multigr., 175 p.
- GAUCHER, G., 1968 - *Traité de pédologie agricole. Le sol et ses caractéristiques agronomiques*. Dunod, Paris, 578 p.
- GILE, L. H., PETERSON, F. F. et GROSSMAN, R. B., 1965 - *The K horizon: a master soil horizon of carbonate accumulation*. Soil Science, Baltimore, 99, 2, pp. 74-82.
- GUERRA, A., 1970 - *Morphology and development of calcareous soils under semi-arid mediterranean climatical conditions*. Institutul Geologie, Studiitehnice si economice, sér. G, Pédologie, 18, pp. 465-475.
- LAMOUREUX, M., 1972 - *Étude de sols formés sur roches carbonatées. Pédogénèse fersialitique au Liban*. ORSTOM, Paris, 266 p.
- LABOVA, E. V., 1967 - *Soil of the desert zone of the U.S.S.R.* Isr. Prog. Sci. Transl., 405 p.
- MCGINNIES, W. F., GOLDMAN, B. J. et PAYLORE, P. et al., 1970 - *Deserts of the world: an appraisal of research into their physical and biological environments*. The University of Arizona Press, 788 p.
- MEESTER, T. DE, 1971 - *Highly calcareous lacustrine soils in the Great Kenya basin, Turkey*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 169 p.
- PEDRO, G., 1972 - *Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe*. Science du sol, Versailles, 1, pp. 5-18.
- RUELLAN, A., 1971 - *Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéenne: les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental)*. ORSTOM, Paris, 302 p.
- SCHOLZ, H., 1971 - *Calcretes and their formation. A survey based on observation in South West Africa*. Pédologie, Ghent, 21, 2, pp. 170-180.
- Sociedad Española de Ciencia del Suelo, 1966 - *Transactions of the Conference on Mediterranean soils*. Madrid, 475 p.
- STACE, H. C. T. et al., 1968 - *A handbook of Australian soils*. Rellim, 435 p.
- U.S.D.A. - *Supplement to soil classification system (7th Approximation)*. Soil Survey Staff, Soil Conservation Service, Washington, multigr., 207 p.