

Ce paragraphe a donc permis de mettre en évidence une corrélation assez étroite, entre l'évolution des minéraux argileux et les autres paramètres examinés. Les trois premiers profils ne sont pas lessivés ; ils sont situés sous les pelouses pseudoalpines ou alpines ; nous discuterons en conclusion des raisons de l'absence de lessivage, sous ce type de végétation. Parmi eux, le profil V 27 est pourtant déjà très évolué, puisque les édifices  $14_V-14_M$  sont, en grande partie, transformés en vermiculite dans l'horizon  $A_1$ . Dans les sols sous forêts, deux phénomènes se succèdent. Le lessivage d'argiles inaltérées entre d'abord en jeu. Le profil V 152 est, à ce titre, instructif. Il est suivi d'une altération des argiles dans les horizons éluviaux, avec libération d'aluminium. L'aluminium libre est, à son tour, entraîné en  $B_2$ . L'altération s'étend peu à peu vers les horizons profonds, mais ce travail n'a pas pu démontrer l'illuviation d'argiles déjà altérées.

Un autre problème n'est pas non plus résolu. Nous ne savons en effet pas sous quelle forme se trouve l'aluminium libre dans ces sols. Il est possible que, dans les horizons riches en vermiculite, les ions  $Al^{+++}$  pénètrent entre les feuillets, comme viennent de le montrer HETIER et TARDY (1969), dans des sols bruns acides ou cryptopodzoliques, sur roches-mères siliceuses.

### 3.35 - UNE COMPARAISON : EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS DE MONTAGNE SUR CALCAIRES TENDRES ET SUR CALCAIRES COMPACTS

Un autre problème se pose lorsque, dans un même étage bioclimatique, on compare l'évolution des minéraux argileux dans les sols sur calcaires tendres et celle sur calcaires compacts. Examinons d'abord les deux types de sols et de roches-mères, sous les pelouses alpines et pseudoalpines. Comparons le profil V 119 des figures 45, page 209 et 46 page 175 aux profils V 95 et V 104 du tableau 7 page 175. Le premier est un sol brun acide sur calcaires tendres ; les seconds sont des sols litho-calciques à mull-moder, sur calcaires compacts. Les trois sont sous pelouses pseudoalpines dans le Vercors. Dans le sol brun acide, le complexe absorbant est désaturé et le pH est, dans l'horizon  $A_1$ , de 5,5 ( $H_2O$ ) et 4,5 (KCl). Les sols litho-calciques sont saturés et les pH sont respectivement de 6,9 ( $H_2O$ ), 6,5 (KCl), pour V 95 et 6,4 ( $H_2O$ ) et 6,3 (KCl), pour V 104. La composition minéralogique des argiles des horizons C est à peu près identique, dans les trois cas ; il s'agit d'édifices gonflants du type  $14_V-14_M$  et  $(10-14_M)-M$  ou encore d'illite. Or on constate, que les argiles sont moins altérées, dans le sol brun acide, que dans les sols litho-calciques. A travers le premier, aucune évolution des minéraux argileux n'est observée (figure 46 V 119). Dans les sols litho-calciques par contre, on aboutit, en  $A_0/A_{11}$  et même déjà en  $A_0/A_{12}$ , à des interstratifiés non gonflants du type  $I-(10-14_V)-V$  (Tableau 7, page 175). Cette différence se reflète également dans les rapports  $Al$  libre/ $Al$  total. Dans le sol brun acide, la valeur maximale, située en  $A_1$ , est de 9,2 % ; dans les sols litho-calciques ce rapport est respectivement de 10,6 %, pour V 95 et de 12,0 %, pour V 104. Les rapports  $Fe$  libre/ $Fe$  total donnent

les mêmes résultats : 59 %, pour le sol brun acide, contre 99 % (V 95) et 68 % (V 104), pour les sols litho-calcaïques. On constate donc, que les minéraux argileux sont moins altérés, dans le sol brun acide sur calcaire tendre, que dans les sols litho-calcaïques à mull-moder sur calcaire compact. Or le premier est désaturé et acide ; les seconds sont saturés et proches de la neutralité.

Une comparaison au niveau des étages forestiers est plus délicate, puisque les sesquioxides libérés sont rapidement entraînés. Cependant, comparons la composition minéralogique des profils V 152, V 157 et V 71 : les sols lessivés ou "lessivés podzoliques" de la figure 46, à celle des sols bruns calcaïques V 58, V 70 sur calcaires compacts du tableau 7, page 175. On constate, que dans les sols bruns calcaïques sur calcaires compacts, les minéraux argileux ont subi une évolution aussi importante, que dans les sols à complexe absorbant désaturé. Même dans le sol brun calcaire V 55 du tableau 7, page 175, les minéraux de l'horizon A<sub>1</sub> ont déjà subi une certaine évolution.

Comment expliquer une altération des minéraux argileux aussi importante, dans des sols à réserve calcaïque, dont le complexe absorbant est saturé et dont les pH sont proches de la neutralité ? Une observation semblable a été faite et la même question a déjà été posée par BLUM (1968), à propos de sols sur différentes roches-mères calcaïques, étudiés dans le fossé rhénan. Plusieurs explications sont possibles. Une acidification saisonnière dans ces sols, où la percolation est importante, a déjà été envisagée au début de ce travail. BLUM (1968) propose deux autres explications. Dans ces sols caillouteux, où les racines sont concentrées dans un faible volume de terre fine, on observe une carence en potassium. Elle provoque, selon cet auteur, une mobilisation de K<sup>+</sup> de l'illite et un écartement accéléré des feuilletts de celle-ci. Cependant, un rôle important est aussi joué par la matière organique. En effet, comme nous l'avons montré au début de ce travail, celle-ci est abondante dans ces sols squelettiques de montagne. Elle se concentre dans le faible volume laissé entre les cailloux. Elle y forme des complexes organo-minéraux stables, protégés par les ions calcaïques. Il y a là, un domaine de recherche dans l'altération des minéraux argileux en milieu très organique et calcaïque, qui est inexploré.

### 3.36 - LA MATIERE ORGANIQUE

Concernant la matière organique dans les sols de montagne à complexe absorbant désaturé, sur calcaires tendres, deux constatations importantes sont à mettre en évidence. La première concerne le profil organique, la seconde, l'illuviation de composés humiques.

Deux types d'humus sont fréquents dans ces sols : les moders et les mulls et en particulier les mulls acides. Les premiers sont moins fréquents que les seconds. Trois caractères morphologiques essentiels définissent ce mull acide : l'horizon organique resté structuré

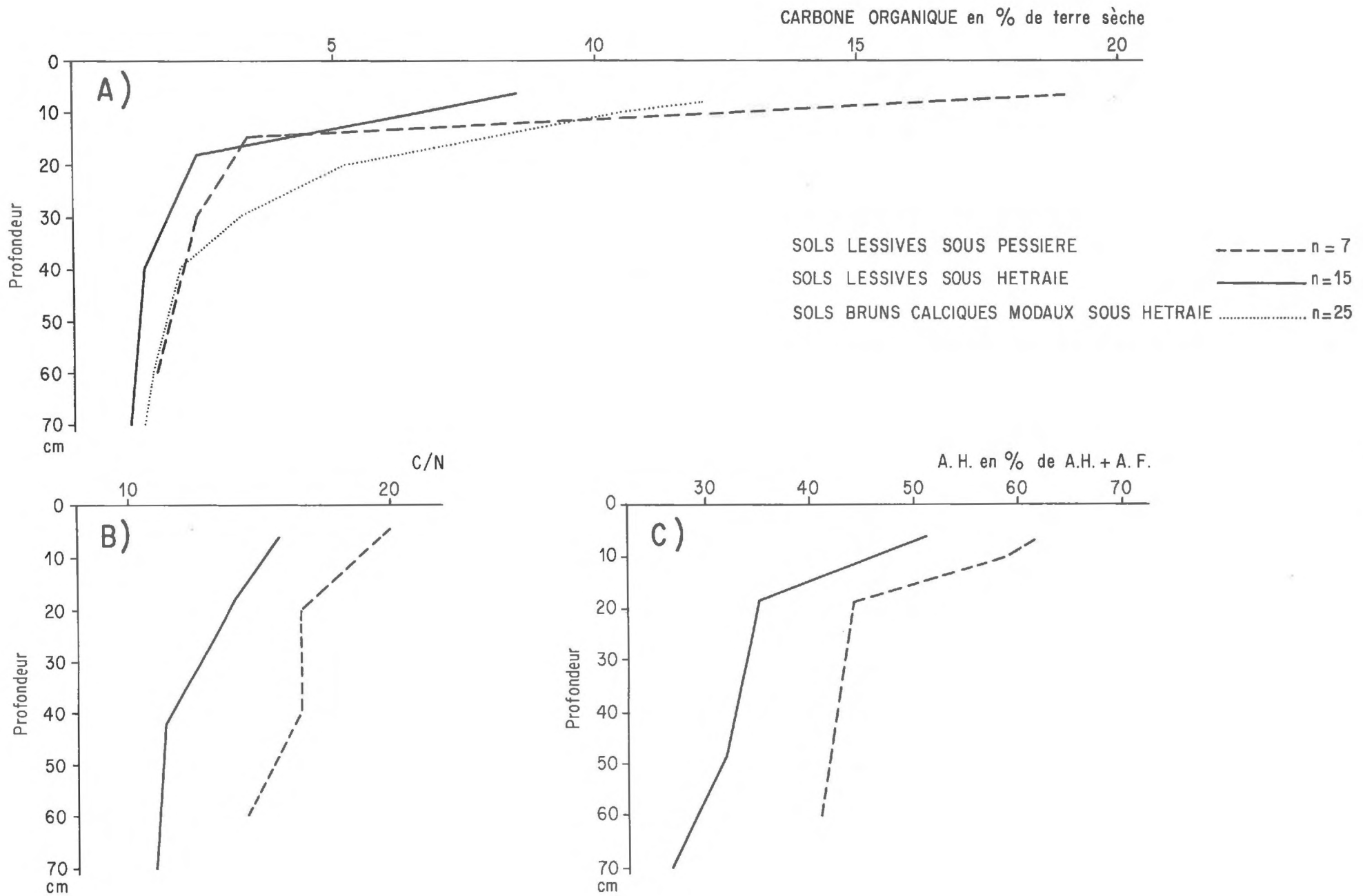


Figure 47 – Valeurs caractéristiques de la matière organique dans les sols à complexe absorbant désaturé.

(généralement polyédrique subanguleux), mais il est d'une consistance très friable ; il est peu coloré par la matière organique (10 YR 5/2) ; enfin il est peu profond \*). Sur le plan chimique ce type d'humus est caractérisé par des teneurs en carbone relativement faibles \*). Ce dernier point est illustré par la figure 47, A. Dans celle-ci, sont représentés les profils organiques, correspondant à trois types de sols : les sols lessivés (modaux ou podzoliques) sous pessière, ceux sous hêtraie, tous les deux étant sur calcaire tendre et les sols bruns calciques sur calcaires compacts. Ces derniers, étudiés au début de ce travail, ont été représentés ici, simplement à titre de comparaison. Rappelons, qu'ils sont à réserve calcique et saturés, tandis que les deux précédents sont sans réserve et acidifiés. On constate, que les profils organiques des sols lessivés décroissent plus rapidement, en fonction de la profondeur, que ceux des sols à réserve calcique. Les premiers sont plus concaves, que les seconds. Cette constatation résulte de faits bien connus : les ions calciques, lorsqu'il sont abondants dans le sol, protègent la matière organique. Ceci a aussi été schématisé dans la figure 44 de 3 à 6 (page 202), où à travers des sols de plus en plus évolués, le profil organique apparaît de moins en moins profond : on passe du mull calcique au mull entrophe puis au acide.

Un autre caractère important est à examiner ; c'est celui de l'illuviation de composés humiques, à travers les horizons lessivés. Il faut d'abord mentionner une constatation d'ordre morphologique. Dans les "sols lessivés podzoliques", on observe parfois, au contact du front de dissolution ou autour des cailloux calcaires, qui subsistent dans les horizons  $B_1$  ou  $B_2$ , une auréole plus foncée que la terre fine, qui n'est pas en contact avec le calcaire des horizons profonds. Il s'agit là probablement, d'une accumulation de matière organique, dans des horizons profonds, au voisinage du front de décarbonatation ou des cailloux calcaires, qui maintiennent autour d'eux une zone à complexe absorbant saturé. Dans les cas les plus favorables, ceci a été décelé par l'analyse du carbone organique. On constate en effet parfois, que le profil organique est légèrement plus riche dans les horizons profonds, au contact des cailloux, que dans les horizons moyens. Mais la différence n'est que de l'ordre de 0,2 à 0,5 % de carbone. Parmi une dizaine de profils, où cet enrichissement a été observé morphologiquement, les analyses l'ont confirmé dans trois ou quatre cas. Ceci n'apparaît naturellement pas dans le profil organique moyen de la figure 47, A.

\*) Le mull acide et le cryptomull décrit dans les sols fersiallitiques sans réserve calcique ont des caractères communs. Ils sont tous les deux peu épais et peu colorés par la matière organique ; ils contiennent aussi relativement peu de carbone. Mais le cryptomull est mieux structuré que le mull acide il a aussi une consistance plus dure à l'état sec.

Deux autres paramètres permettent de présager, d'une illuviation de composés humiques dans ces sols lessivés. Il s'agit des valeurs de C/N, encore élevées dans les horizons profonds, en particulier sous pessière, comme le montre la figure 47, en B. On constate également, que les rapports acides humiques en % de acides humiques + acides fulviques diminuent, d'une manière très importante, en fonction de la profondeur, comme le prouve la figure 47, en C.

Pour vérifier plus amplement cette hypothèse, l'extraction fractionnée des composés humiques (DUCHAUFFOUR JACQUIN, 1965) a été appliquée aux horizons A<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> de quatre "sols lessivés podzoliques": deux sous pessière et deux sous hêtre.

Les résultats, concernant la séparation densimétrique, ne sont pas représentés ici. Les fractions légères des mulls acides sont relativement peu abondantes.

Les différents extraits de composés humiques, obtenus à partir des fractions densimétriques lourdes, sont donnés dans la figure 48. Dans ces horizons non calcaires et partiellement désaturés, le prétraitement acide n'a pas été effectué. L'extrait E.O. n'a donc pas été obtenu. Les résultats ne sont pas présentés ici de la même manière, que dans les chapitres précédents. Dans ceux-ci, le carbone des différentes fractions était exprimé en % du carbone total extrait. L'humine variait en effet peu, à travers les différents types de sols. Dans la figure 48, E.I, E.II, E.III et humine sont exprimés en % du carbone total de la fraction densimétrique = CT. Ces fractions sont portées en abscisse. Le pourcentage des différents extraits est sous forme cumulative : E.I + E.II + E.III + HUMINE = CT = 100 %. Les échantillons, dont les composés humiques sont facilement extractibles, ont leur "courbe cumulative" en haut de la figure. Ceux, dont ils sont plus difficilement extractibles, ont leur "courbe" en bas de la figure.

Avant d'interpréter la figure 48, rappelons rapidement les résultats, qui avaient été obtenus pour les sols bruns calcaires, également sous pessière et hêtre, mais sur roches-mères calcaires compactes. Ces sols étaient à réserve calcique, à travers tous les horizons ; le fer, l'aluminium libre et les argiles étaient peu entraînés. L'hypothèse d'une illuviation de composés humiques, essentiellement liés par le calcium, a été proposée. Cela se traduisait, par une extraction plus rapide de la matière organique des horizons (B), que celle des horizons A<sub>1</sub>.

Les résultats obtenus ici sont différents. Les composés humiques sont extraits plus facilement des horizons A<sub>1</sub> que des horizons B. Comme le montre la figure 48, la différence essentielle est due à l'importance de l'humine.

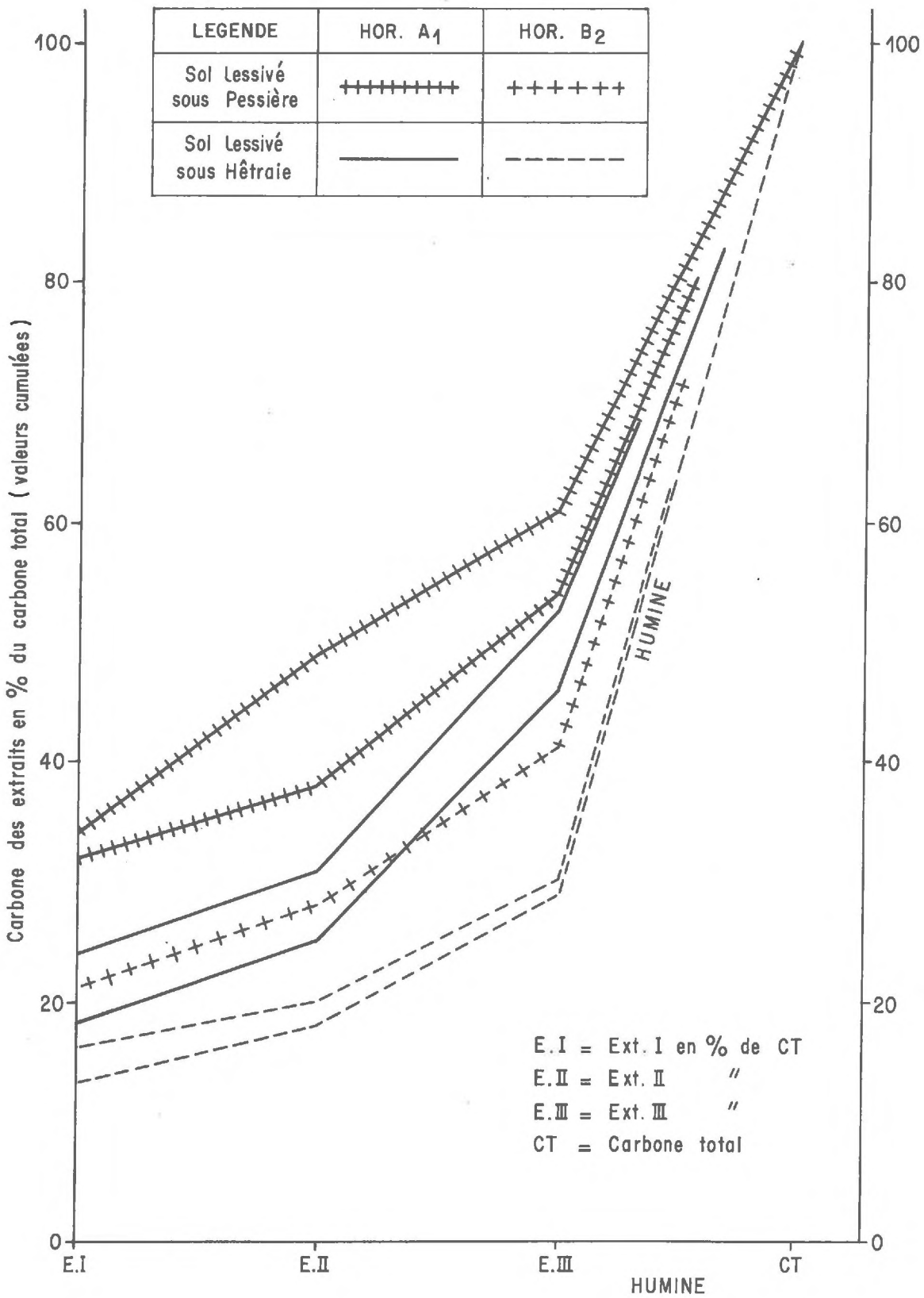


Figure 48 - Extraction fractionnée des composés humiques dans les fractions densimétriques lourdes des horizons A<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> des sols lessivés podzoliques.

Dans les horizons  $A_1$ , l'humine est relativement peu abondante : elle varie entre 40 et 55 %. Dans les horizons B illuviaux par contre, les valeurs sont plus fortes : 60 à 70 %. On a donc, dans les "sols lessivés podzoliques", à l'inverse des sols bruns calciques, des composés humiques plus énergiquement liés dans les horizons B, que dans les horizons  $A_1$ . Cette différence est explicable. En effet, dans les sols bruns calciques, de  $A_1$  à (B), les teneurs en fer libre, en aluminium libre et en argiles variaient peu. On passait d'un milieu saturé ou faiblement désaturé en  $A_1$ , à un horizon (B), où les ions calciques étaient plus facilement mobilisables. Dans les "sols lessivés podzoliques" par contre, les horizons B sont enrichis, par rapport à  $A_1$ , d'éléments qui favorisent une liaison énergétique avec la matière organique, en présence d'un complexe absorbant demeuré saturé, au contact du front ou des cailloux calcaires. Il s'agit, en tout premier lieu des argiles et c'est probablement elles, qui expliquent l'importance de l'humine dans ces horizons illuviaux. Précisons qu'il s'agit là, comme précédemment, d'une explication, d'une hypothèse qui interprète la différence dans l'importance de l'humine, entre les horizons  $A_1$  et les  $B_2$ , dans les "sols lessivés podzoliques".

### 3.4 - LES "SOLS LESSIVES PODZOLIQUES" SUR ROCHES-MÈRES CALCAIRES DURES ET PURES

Dans la deuxième partie de ce travail, consacrée à l'étude des sols sur calcaires compacts, tous les sols examinés étaient à réserve calcique. Ils contenaient un important squelette calcaire, capable de maintenir le complexe absorbant à l'état saturé, dès l'horizon  $A_1$ . Le stade le plus évolué examiné était du type sol brun calcique.

Cependant, à la fin de cette deuxième partie, l'existence de sols plus évolués avait simplement été signalée. On observe en effet, sur ces calcaires compacts, des sols lessivés, lessivés faiblement podzoliques et "lessivés podzoliques", tout à fait semblables à ceux, qui viennent d'être étudiés sur calcaires tendres. Leur étude n'a pas été entreprise dans la deuxième partie afin de ne pas alourdir inutilement ce travail.

Sur calcaires compacts, ces sols se forment dans des conditions géomorphologiques particulières. Deux cas sont à signaler. Le premier est illustré par la figure 49 ; elle représente un "sol lessivé podzolique", développé dans une poche de remplissage karstique. C'est l'absence, ou la présence en faible quantité, de réserve calcique, qui a permis le développement d'un sol évolué au centre de la poche. Ce sol est tout à fait semblable, à ceux sur calcaires tendres. Un seul caractère le distingue : sa position en poche. Sur calcaires tendres, le front de dissolution se trouve à des profondeurs relativement constantes. Sur calcaires compacts, par contre, la profondeur du

sol est très variable. Dans la figure, sur le bord de la poche, le sol est déjà du type sol brun calcique. La réserve y est abondante.

Voici une description morphologique de ce profil.

Profil V 158, en forêt de Lente (Vercors) à la Combe Laval, carte IGN au 1/50 000 feuille de Charpey, C.L. x = 836,2 ; y = 301,5 ; altitude 1 000 m. Sous hêtraie-sapinière avec myrtilles et mélampyre, sur calcaire compact du crétacé inférieur, sur plateau.

- A<sub>00</sub> : 0 - 2 cm litière
- A<sub>0</sub> : 2 - 7 cm structure fibreuse, très aérée, présence de quelques agrégats polyédriques fins entre les fibres, couleur état humide 5 YR 3/2, racines abondantes, passage progressif.
- A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub> : 7 - 20 cm texture limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine à très fine à particulaire, consistance fragile à peu fragile à l'état sec ; couleur à l'état humide 7,5 YR 3/2, absence de cailloux, racines très abondantes, passage progressif.
- A<sub>2</sub> : 20 - 50 cm texture limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine à très fine, consistance peu fragile à l'état sec, couleur à l'état humide 7,5 YR 5/6, absence de cailloux, racines rares, passage progressif.
- B<sub>1</sub> : 50 - 100 cm texture argilo-limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine à moyenne, consistance peu fragile à dure à l'état sec, couleur à l'état humide 7,5 YR 4/6, absence de cailloux, racines abondantes, passage progressif.
- B<sub>2</sub> : 100 - 180 cm texture argileuse, structure polyédrique subanguleuse fine à grossière, consistance dure à l'état sec, couleur à l'état humide 7,5 YR 4/4, présence de quelques cailloux, racines abondantes, passage net au calcaire R.
- R : 180 cm ... calcaire compact avec pellicule de dissolution.

L'autre cas géomorphologique, où sur calcaires compacts ces sols évolués sont également fréquents, est celui de la base des pentes ou des bas-fonds karstiques, dans lesquels se sont accumulés des matériaux fins, dépourvus de réserve calcique.

En résumé, sur calcaires compacts, en montagne, la pédogénèse ne dépasse en général pas le stade sol brun calcique. Les conditions géomorphologiques sont telles, qu'il subsiste dans la plupart des cas, une réserve calcique, jusqu'à la surface du sol. Lorsque, dans des conditions particulières, celle-ci est absente ou peu importante, le sol évolue de la même manière que sur calcaires tendres. Le stade



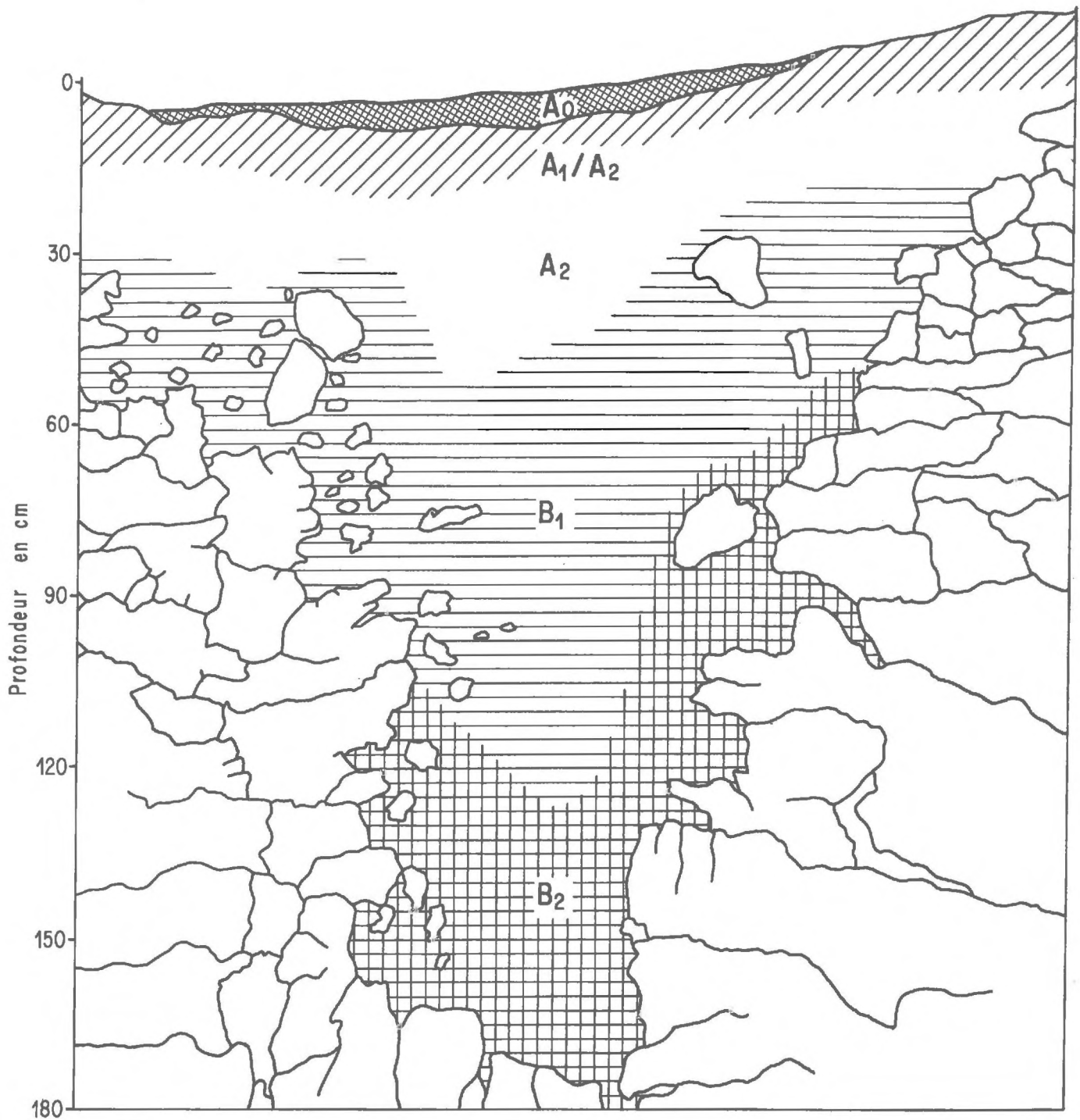


Figure 49 - Un exemple de sol lessivé podzolique sur roches-mères calcaires compactes en montagne.

le plus avancé de la pédogénèse en montagne est alors le "sol lessivé podzologique".

### 3.5 - CONCLUSION

Les calcaires tendres ont été rencontrés sous tous les étages bioclimatiques. Nous avons pu mettre en évidence, sur ce type de roches-mères, une importante évolution des sols à travers la séquence. Elle est possible, grâce à la dissolution rapide de ces calcaires. Elle est liée à une acidification progressive des horizons supérieurs du sol, au fur et à mesure que s'enfonce le front de décarbonatation. Un schéma de cette évolution est représenté dans la figure 50. On passe de sols peu différenciés du type rendzine ou sol brun calcaire, à des sols très différenciés du type "lessivé podzologique".

Sous les conditions méditerranéennes, les sols restent toujours peu différenciés : rendzines ou sols bruns calcaires (figure 50, 1). Le stade appelé sol brun calcique (2), n'est atteint que sur des calcaires plus durs et il s'agit de sols qui sont déjà proches des sols fersialliques à réserve calcique sur calcaires compacts. Un type particulier de sol a été remarqué : c'est le sol brun calcaire, à caractères vertiques. Il est lié à des stations protégées de l'érosion ou à des bas fonds coluvionnés. Il se développe dans des matériaux particulièrement argileux et incomplètement décarbonatés.

La faible différenciation des sols, sous les conditions méditerranéennes, est liée à deux facteurs. D'une part, les conditions bioclimatiques sont défavorables à une décarbonatation rapide. Par ailleurs, la difficulté de réinstallation de la végétation détruite par l'homme, favorise l'érosion.

Ces mêmes stades peu différenciés sont observés sous les pelouses pseudoalpines et alpines. La pédogénèse est entravée pour les mêmes raisons : les fortes pentes favorisent l'érosion. Mais sous ces pelouses, abondamment arrosées, ces phases sont courtes, souvent même inexistantes. La végétation stabilise rapidement les matériaux et les sols les plus fréquents sont du type sols bruns acides (fig. 50, 4 et 5). Ils sont parfois profondément décarbonatés, décalcifiés, mais pas ou peu lessivés.

Sous les forêts de montagne : hêtraie, hêtraie-sapinière, pessière et pinède à crochets, c'est-à-dire sous les étages montagnards et subalpins, les stades précédents sont peu fréquents. D'une part, les matériaux sont généralement stabilisés et d'autre part, ces milieux forestiers sont favorables au lessivage : c'est là que sont les sols les plus développés (6, 7, 8).

Les paramètres les plus importants, qui ont permis de saisir cette évolution, sont également représentés dans la figure 50.

- Considérons d'abord la décarbonatation (le front de déc.) Elle est soumise à trois types de facteurs. Le premier est d'ordre lithologique. Elle est d'autant plus rapide et le front est d'autant plus net que le calcaire est plus poreux et moins compact. Les marnes constituent le matériel le plus favorable, les calcaires compacts, *sont* moins propices: la dissolution y est lente et le front est diffus. Il existe, entre ces deux extrêmes, un grand nombre d'intermédiaires. La topographie est un autre facteur influent. Enfin, un rôle important est joué par les conditions bioclimatiques. Elles favorisent moins la décarbonatation sous climat méditerranéen que sous les étages montagnards subalpins et alpins.

- La décalcification est matérialisée dans la figure 50, par le front de désaturation; c'est la limite, au-delà de laquelle, le complexe absorbant est désaturé: inférieur à 100%. Sous les conditions méditerranéennes, ceci n'est jamais réalisé et dans les sols bruns calciques, le complexe reste saturé. En montagne, ce front se déplace rapidement; il suit de près le front de décarbonatation. Dans la plupart des sols forestiers (6,7,8), les deux fronts se superposent. La nature de la végétation joue un rôle important. Pour des profondeurs de front de décarbonatation à peu près identiques, le complexe absorbant est plus désaturé sous forêt, que sous les pelouses herbacées pseudoalpines ou alpines, même sous les pelouses acides, telles, que celles à Nard.

- Le mouvement des argiles et du fer constitue un autre paramètre intéressant. On constate d'abord, que les argiles et le fer total se comportent de la même manière. Les maxima ("les ventres") sont généralement superposés. Les facteurs, qui conditionnent le lessivage, sont de trois ordres. Le premier concerne l'état du complexe absorbant. Les argiles sont entraînées dans les milieux, où le complexe est en voie de désaturation. En montagne sur calcaires compacts, il existe, des sols bruns calciques étudiés dans la deuxième partie de ce travail, aux "sols lessivés podzoliques", dont un profil a été représenté dans la figure 49, toute une transition de sols de plus en plus évolués et dans lesquels, le rôle de la réserve calcique est de plus en plus réduit. Sur calcaires tendres, le lessivage entre en jeu, dans des sols, où le front de décarbonatation est à des profondeurs encore peu importantes: de l'ordre de 30 à 40 cm. Cependant, les indices d'entraînements sont d'autant plus élevés, que le front est plus profond ou que la réserve calcique est moins abondante.

Un autre facteur, important dans le lessivage, est d'ordre lithologique. Sur certains calcaires très argileux, le lessivage reste réduit et l'horizon  $B_t$  reste proche de la surface. Le milieu est trop compact. C'est le cas du profil 6 de la figure 50, où, sous l'horizon  $B_t$ , existe un B/C décarbonaté mais parfois encore saturé. Ce genre de sol est cependant dans le Vercors rarement hydromorphe. Dans certains

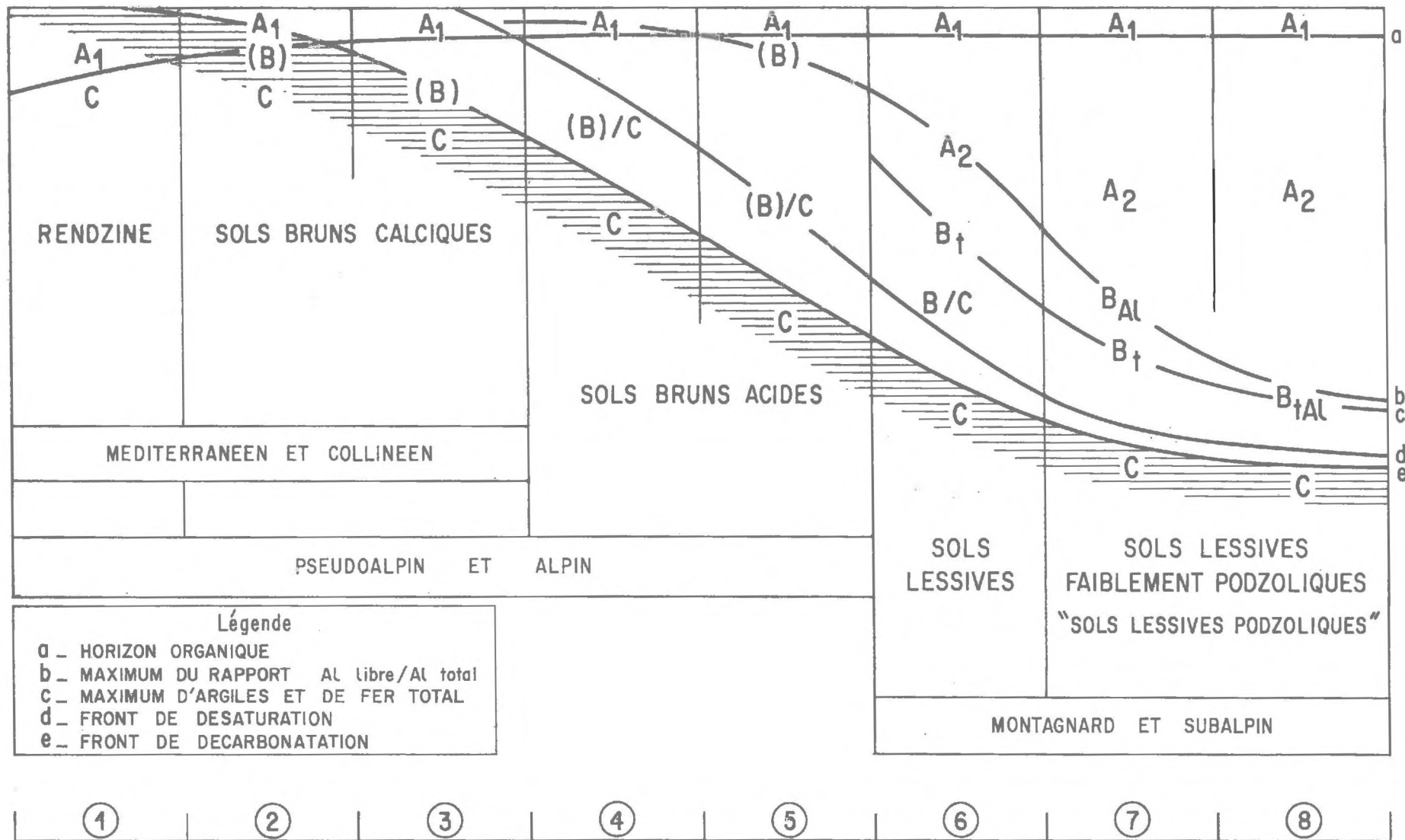


Figure 50 - Schéma de l'évolution des sols sur calcaires tendres à travers la séquence bioclimatique.

calcaires à grains de quartz, le lessivage est par contre très rapide. On rejoint là les calcaires siliceux à chailles ou à silex, qui ont été examinés dans un chapitre précédent. Mais ceux-ci ont été rencontrés uniquement sous les conditions méditerranéennes.

Enfin, toujours dans le lessivage, un rôle est joué par la matière organique. C'est ici qu'il convient de discuter de la faible importance du lessivage dans les sols des pelouses pseudoalpines et alpines et de sa généralisation, dans les sols forestiers de montagne. C'est dans la nature de la végétation, qu'il convient de chercher l'explication. Les litières acides des forêts de montagne, en libérant des composés complexants et résistants à la biodégradation, favorisent le lessivage. Sous les pelouses, ces composés ne se forment pas, ou bien ils ont une vie très brève. Un moyen, bien que très grossier, permet de soutenir cette explication : les valeurs de C/N sous les pelouses sont particulièrement basses : de l'ordre de 10 à 12 en surface et de 8 à 10 dans les horizons organiques profonds. Même dans les sols acides à Nord par exemple, le C/N décroît rapidement en fonction de la profondeur. Des constatations tout à fait semblables avaient déjà été faites dans ces mêmes pelouses, à propos des sols litho-calcaïques à mull-moder sur calcaires compacts. Cette végétation herbacée donne origine à un type de matière organique, qui est peu propice au lessivage. Il faut aussi ajouter l'influence du cycle du carbone. Sous forêt, les composés organiques complexants sont issus essentiellement de la litière. Dans les pelouses alpines ou pseudoalpines, une part importante de la matière organique est incorporée au sol, par les racines.

- Un autre paramètre intéressant est celui de l'altération des argiles, de la libération de l'aluminium, de sa migration à travers le profil. Dans la figure 50, il est matérialisé par la courbe, correspondant à la valeur maximale du rapport Al libre/Al total dans le profil. La libération de l'aluminium intervient tôt dans la série évolutive : dès que le complexe absorbant est en voie de désaturation (figure 50,3). Sur calcaires compacts, l'altération des minéraux argileux débute encore plus tôt : lorsque le complexe est encore saturé. C'est la matière organique, qui semble là jouer un rôle déterminant. L'horizon d'altération se superpose d'abord à l'horizon  $A_1$  (Fig. 50,4). Ce stade est fréquent, en particulier sous les pelouses. Puis, peu à peu le maximum du rapport se déplace vers le bas. C'est d'abord un horizon  $(B)_{Al}$  (5), ensuite sous forêt,  $B_{Al}$ . En fait, dans les sols lessivés podzoliques, il existe deux valeurs maximales du rapport : la première, généralement la plus petite des deux, se trouve en  $A_1$  ; il s'agit là probablement d'aluminium retenu sur le complexe absorbant ou par la matière organique. Le deuxième maximum, celui qui est représenté dans la figure, constitue le  $B_{Al}$ . Ce dernier est d'abord distinct du  $B_t$  (7) puis se confond avec lui  $^{Al}$  (8).

Sous les conditions méditerranéennes, les choses se présentent d'une manière beaucoup plus simple. Dans ces sols restés calcaires ou fortement calciques, les minéraux ne sont pas ou peu altérés ni sur calcaires durs ni sur calcaires tendres.

- Une évolution semblable a été recherchée dans la variation du rapport fer libre/fer total. Mais elle n'est pas aussi instructive que la précédente. La méthode DEB n'a pas apporté de résultat intéressant et les rapports ne sont pas exprimés dans la figure.

- Un dernier paramètre représenté dans la figure 50, est celui concernant le profil organique. On constate, que la matière organique est localisée très superficiellement, dans les sols différenciés : c'est alors un mull acide. Dans les sols calciques ou calcaires par contre, le profil organique s'approfondit, si le substratum géomorphologique le permet : c'est alors un mull calcique.

L'illuviation probable d'une faible quantité de composés organiques mobiles et sa fixation autour des cailloux calcaires ou au voisinage du front de décarbonatation, a également été examinée ; elle n'est pas matérialisée dans la figure. Il s'agit toujours d'une faible quantité de matière organique illuviée. Des études complémentaires concernant ce point méritent d'être entreprises.

En définitive, sur calcaires tendres, ou dans certaines conditions géomorphologiques, sur calcaires compacts, les sols ont en montagne des caractères comparables à ceux des sols sur terrains siliceux. L'influence des carbonates ne se manifeste plus, que dans les horizons profonds.

QUATRIEME PARTIE

SYNTHÈSE

LES PHÉNOMÈNES DE PEDOGENÈSE SUR ROCHES-MÈRES CALCAIRES

## QUATRIEME PARTIE : SYNTHESE

### 1 - LES PHENOMENES DE PEDOGENESE SUR ROCHES-MERES CALCAIRES

L'objet de ce travail était d'étudier l'évolution des sols sur roches-mères calcaires dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine. Celle-ci est localisée dans le midi de la France et les Préalpes du Sud. Elle est définie essentiellement par quatre types de facteurs de pédogénèse :

-L'un est considéré comme constant : la roche-mère calcaire.

-Les autres facteurs sont par contre variables. Ils sont imposés par le climat et la végétation et la séquence est définie, par une succession d'étages bioclimatiques. A l'intérieur de chacun, l'intervention de l'homme a été examinée.

-Dans l'étude de l'évolution des sols, sous les différentes conditions bioclimatiques, l'interférence du facteur temps est également importante. Il existe en effet, à travers la séquence, des sols d'âge très différent.

-Enfin, lorsqu'elle s'est avérée influente, la topographie a également été prise en considération. Son rôle est variable suivant les étages bioclimatiques et les roches-mères.

#### 1.1 - LES FACTEURS DE LA PEDOGENESE

##### 1.11 - LES ROCHES-MERES CALCAIRES

Quatre types de roches-mères calcaires sont distingués. Elles sont définies par leur mode d'altération et par la nature et la quantité de leur résidu de dissolution.

- Les calcaires durs et purs sont encore appelés calcaires compacts\*). Dans ces roches, la dissolution est pelliculaire. Leur structure est microcristalline et la capacité de rétention en eau est faible. L'eau pénètre peu à l'intérieur de la roche ou du caillou et la dissolution du  $\text{CO}_2\text{Ca}$  se fait essentiellement à la surface des pierres ou le long des fissures. La partie interne du calcaire n'est pas altérée. La dissolution est, de ce fait, lente. Les eaux, dans leur parcours le long des fissures, ne perdent leur agressivité que progressivement et la décarbonatation a encore lieu en profondeur. Par ailleurs, le résidu non carbonaté de ces calcaires est faible. Il est surtout constitué d'argiles et de limons. Après dissolution, il s'accumule dans les fissures, mais il enterre rarement la roche. Celle-ci subsiste jusque dans les horizons de surface et les sols formés sont à réserve calcique.

---

\*) Rappelons, comme il a déjà été indiqué en bas de la page 16 que ces calcaires durs sont généralement aussi des calcaires purs, mais que ce caractère est valable uniquement pour les roches des régions étudiées. Cela n'est bien entendu pas le cas pour l'ensemble des roches calcaires.



- Dans les calcaires siliceux, comme précédemment, la dissolution est généralement pelliculaire. Ces roches se distinguent des calcaires durs et purs, par la plus grande abondance de leur résidu de dissolution, non carbonaté. Il est constitué de chailles, de silex et d'argiles ou de limons. Après dissolution, ces matériaux, plus abondants et plus ou moins remaniés, remplissent les fissures, puis s'accumulent à la surface du calcaire. Les sols sont, du moins dans la partie supérieure du profil, dépourvus de réserve calcique.

- Le troisième type de roches est constitué par les dolomies sableuses. Après dissolution du  $\text{CO}_2$ , une importante quantité de sable dolomitique constitué exclusivement de dolomite, s'accumule dans les fissures. Sa présence, en absence d'argiles, donne à la pédogénèse une orientation particulière.

- Les calcaires tendres forment le quatrième type de roche-mère. Dans ceux-ci, le résidu non carbonaté est abondant ; il est constitué d'argiles et de limons. Ces roches sont plus poreuses, leur capacité de rétention en eau n'est pas négligeable. Le mode de dissolution des carbonates est ici très différent, de celui des trois groupes précédents. L'altération n'est plus uniquement pelliculaire ; l'eau pénètre à l'intérieur de la roche ou du caillou ; la dissolution est à la fois externe et interne. La surface de contact de l'eau avec les carbonates est très amplifiée. La décarbonatation est donc très rapide ; mais l'agressivité des eaux est rapidement neutralisée. De ce fait, la dissolution s'exerce essentiellement à la surface des massifs ; elle ne permet plus la formation de fissures profondes. En montagne, lorsque un tapis végétal suffisamment dense, protège le sol de l'érosion, on assiste à la formation d'un front de décarbonatation. C'est une séparation nette, entre la roche-mère encore très calcaire et le sol, dépourvu de squelette calcaire, décarbonaté et acide.

Mais ces calcaires tendres sont aussi sensibles à l'érosion. Celle-ci entre en jeu, chaque fois que le rôle protecteur, de la végétation fait défaut. Le cas se présente parfois sur forte pente, en montagne ; il est général, sous les conditions méditerranéennes.

#### 1.12 - L'INTERFERENCE DU FACTEUR TEMPS : LE KARST ET LES SOLS ANCIENS

L'étude de la pédogénèse, sur ces différents types de roches-mères, est complexe, du fait de l'existence de sols très anciens.

Le problème est relativement simple, en ce qui concerne les calcaires tendres. Ces roches, trop sensibles à l'érosion, n'ont généralement pas conservé de sols anciens. Leurs surfaces ont été rafraîchies, par des phénomènes glaciaires, périglaciaires ou par d'autres types de remaniements plus récents. Les sols sur calcaires tendres, sont généralement actuels ou subactuels. Quelques rares exceptions sont dues à une protection particulièrement favorable de cette roche.

Les trois autres types de roches calcaires sont fréquemment karstifiés. Pour le pédologue, le karst est affecté d'un certain nombre de caractères :

- Il est, au départ, parcouru de fissures d'origine tectonique ou structurale. Pendant la karstification, d'autres phases de fissuration peuvent intervenir. Elles contribuent à la complexité du réseau souterrain.

- Les fentes sont progressivement élargies par la dissolution, la turbulence des eaux, des matériaux qu'elles charrient ou par la glace. La dissolution est pelliculaire, c'est-à-dire qu'elle est lente ; mais les eaux restent agressives en profondeur. Sur calcaires tendres, c'est l'absence de ce mode particulier de dissolution, qui fait que ces roches ne sont jamais ou peu karstifiées.

- La pédogénèse est favorisée, par la concentration des eaux de précipitation et des agents d'altération, au niveau de quelques fissures, qui servent d'exutoire. Il y a effet "d'entonnoir". Les sols sont capables de se développer sur des grandes profondeurs.

- Les surfaces karstiques sont stables. L'existence de fissures et l'absence de réseau hydrographique superficiel, a permis la conservation de sols anciens.

L'importance de l'héritage karstique et des sols anciens est cependant très variable, à travers la séquence.

+ Aux altitudes les plus élevées, c'est-à-dire sur le Haut-Plateau du Vercors et, à un degré moindre, au sommet du Mont Ventoux et de la Montagne de Lure, le karst est encore très peu évolué. Les surfaces ont été rafraîchies par la dernière glaciation. Elles sont couvertes de moraines, de champs de pierres et de lapiaz. Le karst médian est peu développé. Les fentes sont peu élargies par la dissolution. Elles ne contiennent pas de concrétions calcaires. Ces surfaces jeunes non seulement ne portent pas de sol antérieur à la dernière glaciation ; mais elles sont encore dépourvues, ou presque, de matériel résiduel décarbonaté. Ce caractère a une grande importance dans l'évolution du sol.

+ A des altitudes plus basses, les surfaces sont plus évoluées. Cela se manifeste à tous les niveaux du karst. Les niveaux profonds et médians sont plus élargis par la dissolution. Les galeries sont garnies de stalactites, de stalagmites et de colonnes. Dans les niveaux superficiels, les champs de cailloux et les lapiaz subsistent, mais les dolines sont plus fréquentes que dans les karsts d'altitude. Les fissures sont généralement comblées de matériaux de remplissage, qui constituent la roche-mère des sols. Ce matériel est encore fréquemment riche en cailloux et calcaire dans la terre fine ; il est alors d'origine périglaciaire. Mais une karstification, déjà relativement longue a aussi permis l'accumulation de résidu décarbonaté.

+ Les karsts du midi de la France sont encore plus complexes. Ils sont très anciens. Les niveaux souterrains sont polygéniques, plusieurs phases de creusement se sont succédées, depuis le tertiaire. Les niveaux médians sont très corrodés. L'ensemble a été ultérieurement le siège de dépôts calcaires très importants, que l'on retrouve sous forme de stalactites, de stalagmites, de colonnes : de croûtes et de nodules. Les matériaux de remplissage sont généralement décarbonatés. Ceux, restés calcaires, sont plus rares, que dans les karsts de moyenne altitude. Sur ces surfaces très anciennes, leur origine est discutée. Des apports allochtones sont très probables. Les niveaux superficiels ont subi des phases d'érosion mécanique successives et en surface, la terre fine a été fréquemment recarbonatée.

A travers la séquence, l'étude des sols, en relation avec les conditions bioclimatiques, est donc relativement simple sur les calcaires tendres ; leurs surfaces ont rarement conservé des sols anciens. Sur les calcaires karstiques, c'est-à-dire sur les calcaires compacts, les calcaires siliceux et les dolomies, il existe des marques de pédogénèse qui ne sont plus uniquement explicables par les conditions actuelles. Des massifs les plus élevés, aux altitudes plus basses et du Nord au Sud de la séquence, l'héritage karstique et paléopédogénétique est de plus en plus important.

### 1.13 - LES CONDITIONS BIOCLIMATIQUES ACTUELLES

Les conditions bioclimatiques actuelles constituent les facteurs variables, à travers la séquence.

Dans le sud, le climat est du type méditerranéen sub-humide ; il passe vers le nord, au climat méditerranéen humide, puis devient atlantique avec de fortes influences alpines, en altitude.

La variation des conditions bioclimatiques s'exprime, par l'individualisation d'étages de végétation. Ceux-ci débutent au sud, par l'étage méditerranéen, avec la série méditerranéenne du Chêne vert et la série méditerranéenne du Chêne pubescent. Elle est suivie par l'étage collinéen, avec la série subméditerranéenne du Chêne pubescent. Puis vient l'étage montagnard, avec, à sa base, la série mésophile du Hêtre et ensuite, la série de la hêtraie-sapinière. L'étage subalpin est caractérisé, d'abord par la série subalpine de l'Épicéa et, à une altitude plus élevée, par la série externe du Pin à crochets. Enfin, vient l'étage alpin, avec la pelouse alpine sur calcaire. Les sols ont été examinés jusqu'à 2300 m d'altitude (Haut-Plateau du Vercors).

La prospection des sols n'a pas été réalisée d'une manière approfondie à travers toute la séquence. Dans chaque étage bioclimatique, elle a été localisée dans la ou les séries les plus représentatives et dans les régions, où elles sont à leur maximum d'extension. C'est ainsi que cette étude a été réalisée essentiellement dans le Vercors, les Monts du Natin, au Mont Ventoux, sur le Plateau de Saint-Christol, dans les Monts du Vaucluse et dans les Garrigues languedociennes.

Sur les quatre types de roches-mères calcaires, affectées de marques paléopédogénétiques plus ou moins importantes, l'objet de ce travail était d'étudier l'évolution actuelle des sols, en relation avec les conditions bioclimatiques. Les résultats ont été obtenus à partir de l'examen de quatre paramètres ou indices de pédogénèse, fondamentaux.

- La dissolution des carbonates et la dynamique du calcium, à travers les profils.

- L'altération du produit résiduel de dissolution ou des apports allochtones. Ce sont essentiellement les argiles et les composés du fer qui ont été analysés.

- Le lessivage des argiles, de l'aluminium libre et des composés du fer.

- La répartition à travers le profil et la nature de la matière organique.

Les résultats, concernant chacun de ces indices de pédogénèse, seront examinés successivement. Il convient, au préalable, de rappeler les principaux types de sols rencontrés ;

## 1.2 - RAPPEL DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS EXAMINES

Ils sont regroupés dans le tableau 14. Dans celui-ci, quatre grands "blocs" \*) sont distingués. Ils constituent les entrées verticales. Ce sont :

- les sols calcaires : ils sont saturés, ils sont calcaires dans la terre fine et ils ont une réserve calcique (\*\*) dans le squelette.

- les sols à réserve calcique (\*\*): ils sont encore saturés, la présence du squelette calcaire assure le renouvellement des ions calciques dans la terre fine, mais ils sont décarbonatés.

- les sols calciques : ils n'ont ni calcaire dans la terre fine, ni réserve, mais leur complexe absorbant reste cependant saturé. Comme nous verrons plus loin, ce cas est rare. Il est lié à des conditions particulières.

- les sols désaturés (S/T inférieur à 80 %)

Dans le tableau, les entrées horizontales correspondent aux classes de sols définies par la CPCS. Les sols examinés appartiennent à cinq classes \*\*\*) . Les sous-classes \*\*\*) et les groupes \*\*\*) apparaissent en lettres majuscules, les premières sont soulignées, les sous-groupes sont en lettres minuscules.

La classification des sols ne sera pas discutée davantage ici. A ce sujet, un dépouillement statistique plus complet de l'ensemble des données analytiques des 300 à 350 profils est actuellement en cours. Il consiste en un classement multivariable par similitude. Tous les indices de pédogénèse sont pris en considération ; ils sont au nombre de 60. Les résultats de ce travail, réalisé en collaboration avec G. GRANDJOUAN, FAURE et F. ROMANE seront publiés ultérieurement.

---

\*) Pour éviter la confusion avec "groupe" ou "classe", termes bien définis dans la classification française des sols, nous utiliserons ici plutôt "blocs".

\*\*\*) En fait, sur roches calcaires, cette réserve est calcaire et non calcique "Réserve calcique" est un terme général utilisé par la CPCS et concernant non seulement les roches carbonatées mais toute roche qui est susceptible d'alimenter la terre fine en ions  $Ca^{++}$ . Par souci de simplification nous maintenons donc le terme "réserve calcique".

\*\*\*\*) "Classe, sous-classe, groupe et sous-groupe" ont la même signification que dans la classification française des sols.

TABLEAU 14 - RAPPEL DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS RENCONTRES DANS LA SEQUENCE

CLASSES DE SOLS DE LA CPC	SOLS CALCAIRES	SOLS A RESERVE CALCIQUE *)	SOLS CALCIQUES	SOLS DESATURES
SOLS MINERAUX BRUTS	<u>SOLS MINERAUX BRUTS NON CLIMATIQUES</u> D'EROSION D'APPORT COLLUVIAL - REGOSOLS - LITHOSOLS			
SOLS PEU EVOLUES	<u>SOLS PEU EVOLUES NON CLIMATIQUES</u> D'EROSION D'APPORT COLLUVIAL	<u>SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES</u> - à xéromoder ou xéromor - à Mull-Moder - à Moder ou Mor		
SOLS CALCIMAGNESIQUES	<u>SOLS CARBONATES</u> - Sol humo-calcaire - Rendzine - Sol brun calcaire - Sol brun calcaire vertique - Rendzine dolomitique	<u>SOLS SATURES</u> - Sol humo-calcaire - Rendzine brunifiée - Sol brun calcaire humifère - Sol brun calcaire modal	Sol brun calcaire modal	
SOLS BRUNIFIES				SOLS BRUNS - sol brun modal - sol brun acide SOLS LESSIVES - sol lessivé modal - sol lessivé faiblement podzologique - "sol lessivé podzologique"
SOLS A SESQUIOXYDES DE FER	<u>SOLS FERRALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE</u> - modal (avec ou sans B <sub>Can</sub> ) - brunifié - encroûté - à caractères hydromorphes avec généralement un B <sub>Can</sub> - recarbonaté			<u>SOLS FERRALLITIQUES SANS RESERVE CALCIQUE</u> - modal - hydromorphe - très lessivé - très lessivé et très hydromorphe

\*) Voir note infrapaginale page 232\*\*

### 1.3 - LA DISSOLUTION DES CARBONATES ET LA DYNAMIQUE DES BASES A TRAVERS LE PROFIL

Rappelons brièvement les facteurs de la décarbonatation. Ils sont au nombre de trois :

- Elle est d'autant plus importante, que les précipitations sont plus abondantes.
- La solubilité du  $\text{CO}_2$  et la formation de bicarbonates est favorisée par les eaux froides.
- Un rôle important est joué par la quantité et la nature de la matière végétale et de la matière organique du sol. Les litières acides et les humus bruts libèrent des composés agressifs solubles, dont la biodégradation est lente. La végétation herbacée et les litières de Chêne vert ou de Chêne pubescent sont moins favorables.

A travers la séquence, de l'étage alpin à l'étage méditerranéen, ces facteurs sont de moins en moins propices à la décarbonatation et à l'élimination des ions calciques, au delà du profil. Il convient d'examiner ces deux processus, sur chacun des quatre types de roches-mères.

#### 1.31 - SUR ROCHES-MERES CALCAIRES COMPACTES

Certains indices permettent d'estimer l'importance de la décarbonatation et de l'élimination des ions calciques.

- Le premier, c'est l'état d'évolution du karst. Celui-ci n'est guère utilisable, puisqu'il subsiste un héritage des temps passés. Les karsts les moins évolués sont en montagne, où les conditions bioclimatiques sont très favorables. Les plus évolués sont dans le midi de la France, où les facteurs sont actuellement les moins propices. Quel que soit l'état d'évolution du karst, la roche-mère calcaire subsiste généralement jusque dans les horizons de surface. Les sols sont à réserve calcique. Dans tous les horizons, celle-ci alimente constamment le profil en ions  $\text{Ca}^{++}$ . C'est un caractère fondamental des sols sur calcaires compacts.

- Le calcaire total dans la terre fine et sa répartition dans les fractions granulométriques constituent un autre indice de pédogénèse. Sur ce type de roche-mère, la dissolution est essentiellement pelliculaire. S'il subsiste du calcaire dans la terre fine, il résulte d'actions mécaniques : gélifraction, érosion, interventions anthropiques. Dans tous les sols examinés. Le calcaire de la terre fine n'est jamais très abondant. Il est localisé dans les sables ou les limons grossiers, rarement dans les fractions granulométriques plus fines. Concernant cet indice, il apparaît ici une première différenciation, à travers les sols de la séquence. Sous les étages bioclimatiques favorables à la décarbonatation : alpin, subalpin et montagnard, le  $\text{CO}_3\text{Ca}$  subsiste rarement dans les horizons  $\text{A}_1$ , malgré la forte gélifraction. Les horizons (B) par contre, restent fréquemment carbonatés. Ce profil calcaire est actuel. Dans les sols du midi de la France, trois niveaux sont distingués. A la base, se trouvent les horizons  $\text{B}_{\text{Can}}$  et  $\text{B}_{\text{Cac}}$ . Ils sont très développés. Les horizons B ou (B) qui les surmontent, sont

décarbonatés. Les deux types d'horizons présentent des marques de paléopédogénèse. Les  $A_1$ , par contre restent carbonatés. Sous ces étages, à influences méditerranéennes, les conditions bioclimatiques actuelles ne sont plus capables d'éliminer rapidement les carbonates, dont la terre fine a été réalimentée. Le profil calcaire est polygénique.

- Le calcaire actif, déterminé par la méthode DROUINEAU, constitue un troisième indice de pédogénèse. Les résultats, obtenus par cette méthode, n'ont guère été exploités. Les valeurs obtenues étaient toujours très faibles. Le calcaire se trouve, en effet, essentiellement dans les fractions granulométriques grossières :

- Il reste à examiner l'état du complexe absorbant et les valeurs de pH. Ces sols sont généralement proches de la saturation ou saturés. A travers la séquence, quatre cas sont à distinguer.

+ Le premier est représenté par les sols litho-calciques humifères à moder. Ces sols, sous résineux (Pins à crochets ou Epicea), sont constitués par un horizon  $A_0$ , qui recouvre la roche R. Sous celui-ci, se développe parfois un hor  $A_1$ , encore peu important et intimement imbriqué dans le squelette calcaire. Les horizons  $A_0$  sont désaturés. Les valeurs de S/T y sont désordonnées et il n'existe pas de corrélation, entre S et T. Deux raisons expliquent ces faits. D'une part, la dissolution des carbonates, à la surface du squelette, n'est pas suffisamment rapide, pour saturer le complexe absorbant de l'humus brut. Par ailleurs, le moder recouvre partiellement les cailloux et le mélange entre l'humus et la réserve calcique est imparfaitement réalisé. Les valeurs de pH ( $H_2O$ ) de ces horizons  $A_0$  varient autour de 5,5 et celles de pH (KCl) autour de 5,2.

L'horizon  $A_1$ , situé sous l'humus brut, est déjà saturé. Mais la décarbonatation dans la terre fine est complète. Dans ces horizons  $A_1$ , les conditions sont en effet très favorables à la dissolution des carbonates et à l'élimination des ions calciques au delà du profil. La percolation est intense ; les eaux sont chargées en  $CO_2$  et en acides organiques qui proviennent de l'humus brut. La dissolution s'exerce activement à la surface du squelette. Dans ces horizons  $A_1$ , la terre fine est intimement mélangée à la réserve calcique. Elle est située dans les mailles du squelette. Les ions  $Ca^{++}$ , qui sont éliminés du profil, sont constamment renouvelés à partir de la réserve et le complexe reste rigoureusement saturé à S/T = 100 %. Il existe en effet, entre S et T, une corrélation très hautement significative : au seuil de 99,9 %. C'est le seul cas rencontré dans la séquence. La droite de corrélation se confond avec l'axe de S/T = 100 %.

+ Le deuxième cas retenu, pour illustrer la variation du profil calcique à travers la séquence, est celui des sols bruns calciques, également situés sous les résineux des étages subalpin ou montagnard, c'est-à-dire, sous des conditions de décarbonatation encore très favorables. Morphologiquement, ces profils se distinguent des précédents, par le fait que dans les horizons  $A_1$ , la proportion de la terre fine par rapport au squelette est plus importante.

Dans ces horizons, les surfaces de dissolution des carbonates sont plus réduites ; la réserve calcique est noyée dans une plus grande quantité d'argiles de décarbonatation. Cela entraîne une modification du profil calcique. Le complexe absorbant est partiellement désaturé. La droite de corrélation se situe au niveau de  $S/T = 80 \%$ . Elle reste encore significative au seuil de  $99 \%$ . Les valeurs du pH ( $H_2O$ ) sont de l'ordre de 6,2 et celles de pH (KCl) de 5,6. Le renouvellement des ions calciques, à partir de la réserve, est déficient. Ces sols bruns calciques, situés sous les résineux des étages humides, constituent le seul cas de sols à réserve calcique, dont les horizons  $A_1$  sont partiellement désaturés. Dans les horizons (B), fréquemment calcaires, le complexe est rapidement saturé et le pH ( $H_2O$ ) monte à 7,1.

+ Le troisième type de profil calcique est caractéristique de plusieurs autres types de sols. Le complexe est saturé dès l'horizon  $A_1$ . Cependant les valeurs de pH ( $H_2O$ ) sont encore proches de la neutralité. Il s'agit ici aussi de sols, qui se trouvent sous les étages bioclimatiques de montagne, où les conditions de solubilisation et d'élimination des carbonates sont encore favorables. Elles sont cependant moins propices, que précédemment. Ce type de profil calcique est lié aux sols litho-calciques à mull-moder des pelouses alpines et pseudoalpines. Malgré la très forte percolation, le complexe absorbant reste saturé pour deux raisons. D'une part, ces sols très squelettiques présentent des surfaces de dissolution très importantes. Par ailleurs, ils sont sous végétation herbacée et les composés humiques agressifs sont, par l'effet rhizosphère, rapidement biodégradés. Ce profil calcique se trouve aussi dans les sols bruns calciques et dans les sols humo-calciques, sous la hêtraie mésophile. Là, ce sont les conditions bioclimatiques, qui sont moins favorables.

+ Le quatrième type de profil calcique est très différent des trois premiers. Il est lié aux sols fersiallitiques du midi de la France. Dans ces sols, le calcaire, dont la terre fine a été réalimentée, est difficilement éliminé. Cela se répercute dans le profil calcique et dans les valeurs de pH. Dans ces sols et dans tous leurs horizons, les valeurs de S obtenues, lors du déplacement des bases échangeables, étaient toujours nettement supérieures aux valeurs de T. Dans la terre fine, la décarbonatation est donc incomplète. Les valeurs de pH sont élevées, dès l'horizon  $A_1$ . Elles sont pour pH ( $H_2O$ ) comprises entre 7,5 et 7,7 et pour pH (KCl) entre 6,8 et 7. Des horizons  $A_1$ , à  $A_3$  puis à (B), ces valeurs sont invariables ; elles sont de 8, pour pH ( $H_2O$ ), dans les horizons  $E_{Ca}$ .

En définitive, dans ces sols à réserve calcique, généralement saturés deux indices de pédogénèse ont permis d'estimer l'importance de la décarbonatation et la vitesse d'élimination des ions calciques. Les teneurs en  $CO_3Ca$  dans la terre fine et leur répartition dans les fractions granulométriques, font apparaître une première différenciation, entre les sols de montagne, où le calcaire est rapidement dissout et ceux sous conditions méditerranéennes, où le  $CO_3Ca$  persiste dans les horizons de surface. L'examen du complexe absorbant, des corrélations entre S et T et des valeurs de pH apporte d'autres précisions.



### 1.32 - SUR CALCAIRES SILICEUX

Les sols fersiallitiques, examinés dans le midi de la France, sur calcaires siliceux, sont sans réserve calcique, dans la totalité du profil ou plus souvent, dans les horizons éluviaux et la partie supérieure du B. Dans la terre fine, ils sont généralement décarbonatés, à travers tout le profil. Un caractère important de ces sols concerne les valeurs de S/T. Elles sont très dispersées, mais relativement élevées. Même dans les horizons éluviaux, S/T est généralement supérieur à 65 %. C'est un caractère méditerranéen, qui distingue ces sols, des sols lessivés examinés sous les étages humides ; ceux-ci sont davantage désaturés.

### 1.33 - SUR DOLOMIES

Comme sur les calcaires compacts, les sols sur dolomies sont à réserve calcique ; c'est-à-dire, que des cailloux, restés calcaires, subsistent jusque dans les horizons de surface. Le sable dolomitique est, par contre, dépourvu de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Dans la terre fine, essentiellement sableuse, pauvre en argiles et en matière organique, la capacité totale d'échange est très faible. En absence de pouvoir tampon, le pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) est élevé : entre 8 et 9.  $\text{Mg}^{++}$  représente en milliéquivalents-grammes, jusqu'à 25 % de la somme des bases.

### 1.34 - SUR CALCAIRES TENDRES

Sur calcaires tendres, les surfaces ont rarement conservé des marques de paléopédogénèses. Sous les conditions méditerranéennes, les sols sont peu évolués. Deux facteurs sont en effet particulièrement défavorables à la pédogénèse. La décarbonatation est lente ; nous l'avons vu précédemment. Par ailleurs, la végétation actuelle est incapable de protéger le sol de l'érosion. L'altération mécanique l'emporte sur la pédogénèse. Les sols restent calcaires, jusque dans les horizons de surface. Le  $\text{CO}_3\text{Ca}$  est présent dans toutes les fractions granulométriques, jusque dans les fractions inférieures à  $2\ \mu$ . On note cependant fréquemment, du haut en bas du profil, un gradient croissant du  $\text{CO}_3\text{Ca}$  total et de celui des fractions granulométriques fines.

Sous les étages montagnard, subalpin et alpin, l'évolution du profil calcaire, sur ce type de roche-mère, est par contre très rapide. Lorsque la pente n'est pas excessive, la végétation est capable de protéger le sol de l'érosion. Aux conditions bioclimatiques très propices à la décarbonatation, s'ajoute ici le facteur lithologique discuté précédemment ; il accélère le processus. On assiste à la formation et au déplacement relativement rapide à travers le profil, d'un front de décarbonatation. C'est la limite généralement très nette, au-dessus de laquelle, le sol est décarbonaté dans la terre fine, décalcifié et acide. En dessous, il subsiste par contre encore une grande quantité de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Au contact de ce front, les solutions agressives sont rapidement neutralisées.

Dans ces sols, le départ de la réserve calcique, entraîne rapidement la désaturation du complexe absorbant. Cependant, la dynamique des ions  $\text{Ca}^{++}$  est conditionnée par la nature de végétation. Sous les forêts : hêtraie, sapinière, pessière et pinède à crochets, trois niveaux sont distingués dans le profil calcique. Dans les horizons  $A_1$ , sous l'effet du cycle biologique, les valeurs

de S/T restent relativement élevées. Le plus fort degré de désaturation (entre 10 et 20 %) est observé en A<sub>2</sub>. A travers les horizons (B) ou B, S/T augmente progressivement et, au contact du front de dissolution, le complexe absorbant est saturé. Dans les pelouses alpines et pseudo-alpines, le degré de saturation est plus élevé. C'est sous ces pelouses, qu'ont été observés des sols sans réserve calcique, mais dont le complexe est resté saturé. Ils sont mentionnés dans le troisième "bloc" du tableau 14. C'est encore l'absence, sous cette végétation herbacée, de composés organiques agressifs qui semble en être responsable.

#### 1.4 - EVOLUTION DES PRODUITS RESIDUELS DE DISSOLUTION ET DES APPORTS ALLOCHTONES

La décarbonatation est accompagnée d'une accumulation d'éléments résiduels de dissolution. Ceux-ci sont plus ou moins abondants, suivant les types de roches-mères. Ils sont souvent profondément remaniés. Dans les karsts du midi de la France, des apports allochtones sont vraisemblables. Ces matériaux sont généralement argileux et limoneux. Leur évolution est conditionnée par les profils calcaire et calcique. Trois paramètres ont permis de l'examiner, sous les différentes conditions bioclimatiques : la modification de la minéralogie des argiles à travers les profils, la libération d'aluminium et l'évolution des composés du fer. Le lessivage sera examiné au paragraphe 1.5.

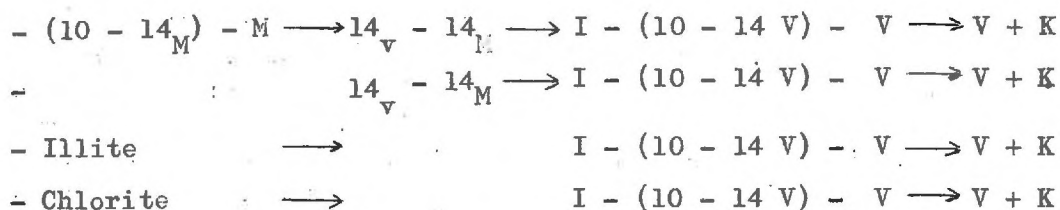
##### 1.41 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX

La composition minéralogique du résidu des roches-mères calcaires est hétérogène à travers la séquence. Deux provinces sont distinguées.

- Dans le Vercors et sur le bord septentrional de la Fosse Vocontienne, les calcaires compacts urgoniens et les calcaires tendres sont du Crétacé inférieur. Dans le résidu de dissolution, des édifices interstratifiés gonflants, du type (10 - 14<sub>M</sub>) - M et 14<sub>V</sub> - 14<sub>M</sub> ou de l'illite prédominant. Ils sont souvent accompagnés d'un mélange de kaolinite-chlorite dans lequel la chlorite est très abondante. Parmi les 25 profils analysés, la montmorillonite n'a pas été observée.

- Dans le Languedoc, les calcaires durs titoniques sont du Kimméridgien-Portlandien. Dans le résidu, l'illite prédomine sur le mélange kaolinite-chlorite, dont la chlorite est également peu abondante. Cependant, pour le pédologue, la composition minéralogique du résidu des roches-mères calcaires est peu significative dans ces karsts du midi de la France, puisqu'il est fort probable, que le sol se soit également développé, sur des matériaux allochtones.

A travers tous les sols examinés, la kaolinite est conservée. La chlorite, l'illite et les interstratifiés sont dégradés. Leur évolution se trouve à des stades plus ou moins avancés, suivant les types de sols ; mais elle est soumise à un même mécanisme : la vermiculitisation. Celle-ci est réalisée à travers les différentes étapes suivantes :



L'évolution d'un édifice du type micacé, en direction de la vermiculite, est considérée par la plupart des minéralogistes comme une dégradation discrète. Celle-ci consiste en une extraction, hors du réseau, des ions les plus solubles, c'est-à-dire les ions alcalins et alcalino-terreux : K, Na, Ca, Mg ; ils sont en général en position interfoliaire ; les feuillets eux-mêmes sont peu touchés par cette dégradation. Celle-ci prend place dans les milieux, où les hydrolyses sont ménagées. L'individualisation de vermiculite constitue le terme ultime de la dégradation ; or ce type d'argile n'est observé que dans les sols les plus différenciés. Généralement, l'altération s'arrête aux stades intermédiaires. Cinq cas sont à considérer.

- Le stade vermiculite est généralement atteint dans les sols "lessivés podzoliques". Ils n'ont, en effet, pas de réserve calcique ; ils sont désaturés et acides. La dégradation débute dans les horizons  $A_1$  et  $A_2$  ; la vermiculite apparaît ensuite dans les horizons B. Elle peut avoir là une double origine : elle est illuviée, ou résulte d'une altération in situ. Ce deuxième cas est moins fréquent, puisque en B, le complexe absorbant est généralement encore proche de la saturation.

- Le deuxième cas est représenté par des sols également dépourvus de réserve calcique. Il s'agit des sols fersiallitiques sans réserve. Ils sont sous des conditions méditerranéennes et le profil calcique est moins désaturé que précédemment. L'étude de l'évolution des minéraux argileux dans ces sols est rendue difficile, du fait qu'on ne connaît généralement pas leur roche-mère. L'interprétation est faite à partir de l'évolution à travers les horizons  $A_1$  et B. Dans les deux types d'horizons, la kaolinite ne dépasse pas 30 à 40 % ; elle est subordonnée à des édifices 10 - 14 Å, qui prédominent. Comme précédemment, les horizons  $A_2$  sont dégradants et l'altération se fait encore dans le sens de la vermiculitisation. Cependant, le stade vermiculite n'est ici pas généralisé. Dans ces milieux plus calciques, la dégradation s'arrête fréquemment à des stades intermédiaires. Dans les horizons B, les édifices 10 - 14 Å sont du type I -  $(10 - 14_M) - M$ . C'est une tendance vers la montmorillonite. Mais les mécanismes qui expliquent sa présence, sont encore mal connus.

- Le troisième cas retenu, pour illustrer l'évolution des minéraux argileux, est celui représenté par les sols à réserve calcique, qui se rencontrent sous les conditions humides. Il s'agit des sols litho-calciques humifères, des sols humo-calciques, et des sols bruns calciques, des étages alpin, subalpin et montagnard. Ils se distinguent des sols "lessivés podzoliques," rencontrés sous les mêmes étages, par le fait, qu'ils sont proches de la saturation ou saturés et qu'ils sont plus riches en matière organique. Dans ces sols, l'état d'évolution des minéraux argileux est étroitement lié au profil calcique. Dans les

horizons supérieurs des sols bruns calciques, sous la pessière, S/T est de l'ordre de 80 % et la vermiculitisation est pratiquement complète. Par contre, dans les sols litho-calciques à mull-moder des pelouses alpines et pseudo-alpines, dans les sols humo-calciques et bruns calciques de la hêtraie, où le complexe absorbant n'est pas désaturé, la dégradation s'arrête aux stades intermédiaires.

Cependant, dans ces sols très humifères, indépendamment des profils calciques et des valeurs du pH, un rôle important semble aussi être joué par la matière organique, dans l'altération des minéraux argileux.

- Le quatrième cas est encore représenté par des sols à réserve calcique ; mais ils se trouvent sous des conditions plus sèches, que les précédentes ; leur complexe absorbant est saturé, à travers tout le profil et les valeurs de pH sont élevées. Il s'agit des sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France. Dans ces sols, on ne connaît pas non plus la roche-mère et l'interprétation est déduite de l'évolution des minéraux, à travers les horizons A<sub>1</sub>, A<sub>3</sub> et (B) rouges, ocres ou bariolés. On constate, qu'il n'y a pas d'évolution. Dans ces sols, la composition minéralogique est invariable à travers les horizons, quels que soient leur type génétique ou leur couleur. Partout, l'illite prédomine sur la kaolinite. Comparés aux précédents, les sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France sont des milieux conservateurs, vis-à-vis des minéraux argileux. Aucune évolution n'est mise en évidence.

- Il reste un dernier type d'altération à mentionner. Il concerne les sols carbonatés du midi de la France. Dans deux rendzines analysées, les argiles, présentes dans la roche-mère, sont constituées essentiellement d'attapulgite. Ce minéral, très altérable, se conserve rarement dans les sols. Dans un des deux cas, elle est partiellement remplacée, en A<sub>1</sub>, par de la montmorillonite ; dans l'autre cas, elle subsiste intégralement dans l'horizon de surface. Dans ces sols restés carbonatés, les minéraux même très altérables subsistent.

#### 1.42 - LA LIBERATION D'ALUMINIUM

Parallèlement à l'étude de la minéralogie des argiles, un autre paramètre a également été examiné ; le rapport aluminium libre/ aluminium total. L'"aluminium libre" a été extrait, en même temps que le "fer libre", en présence d'hydrosulfite de sodium et de tartrate de sodium. Concernant les résultats obtenus, deux remarques sont à faire. D'une part, ils se superposent assez étroitement, à ceux fournis par la minéralogie des argiles ; par ailleurs, comparé au rapport fer libre/fer total, examiné dans le paragraphe suivant, celui relatif à l'aluminium apporte des renseignements plus intéressants. Dans l'interprétation des résultats, il convient de reprendre les mêmes types de sols que ceux qui ont été examinés au paragraphe précédent.

- Sous les étages bioclimatiques humides, les horizons A<sub>2</sub> des sols lessivés sont généralement en voie de podzolisation. Celle-ci s'installe après le lessivage des argiles. L'aluminium libéré est partiellement entraîné. A travers les profils, deux maxima du rapport Al libre/Al total sont enregistrés.

Le plus faible des deux (de l'ordre de 10 %) est dans l'horizon  $A_1$ . Il s'agit probablement là, d'aluminium libéré et resté partiellement dans l'horizon organique, sous forme échangeable. Dans l'horizon  $A_2$ , se trouvent les valeurs minimales. L'aluminium libéré est lessivé. Le maximum le plus élevé (jusqu'à 16 %) est observé en B.

- Par rapport aux sols précédents, dans les sols fersiallitiques sans réserve calcique, deux différences essentielles sont observées. Dans les horizons  $A_1$ , on enregistre encore une certaine libération d'aluminium, mais les rapports Al libre/Al total sont plus faibles, que dans les horizons  $A_1$  des sols précédents. Ils dépassent rarement 10 %. Une autre différence fondamentale apparaît au niveau des horizons B ; alors que dans les sols précédents, on observe généralement une illuviation d'aluminium, resté libre en B, celle-ci n'est jamais mise en évidence dans les sols rouges lessivés. Les rapports Al libre/Al total sont, en B, inférieurs à 5 %. Entre les sols lessivés examinés ici et les sols fersiallitiques sans réserve calcique, apparaît donc une différence fondamentale : dans les premiers, on observe fréquemment une libération et un entraînement d'aluminium libre ; dans les seconds, ces deux processus sont actuellement très réduits.

- Le troisième cas, qui a été mentionné précédemment, est celui des sols à réserve calcique, sous les étages bioclimatiques humides : sols litho-calciques humifères, sols humo-calciques et sols bruns calciques. Dans ces sols, proches de la saturation ou saturés, très organiques, la vermiculitisation était plus ou moins avancée. On constate, que le rapport Al libre/Al total est plus ou moins élevé : il varie entre 8 et 13 %, en  $A_1$  et baisse rapidement dans les horizons (B), plus calciques et fréquemment calcaires. Ces sols sont, en  $A_1$ , également en voie de podzolisation ; mais l'aluminium libéré n'est pas entraîné.

L'état sous lequel se trouve l'aluminium libre, dans ces sols de montagne, n'a pas été défini. En particulier, il n'a pas été possible de montrer, s'il se trouve à la surface des argiles ou intégré entre les feuillets. Ce dernier cas est, en effet, fréquemment observé dans les sols podzoliques.

- Le quatrième groupe, qu'il convient de citer, est celui des sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France. Dans ces sols très calciques, la vermiculitisation n'entre pas en jeu. Des minéraux, tels, que l'illite, sont conservés. Ce résultat est confirmé, par les valeurs du rapport Al libre/Al total. Elles sont très faibles, de l'ordre de 3 à 8 %. Comparés aux sols à réserve calcique précédents l'altération est très réduite à travers tout le profil.

- Enfin, dans le cinquième groupe, celui des sols carbonatés du midi de la France, les rapports Al libre/Al total sont également très bas.

#### 1.43 - EVOLUTION DES COMPOSES DU FER

Dans ce travail, des trois indices de pédogénèse, qui permettent d'estimer l'état d'évolution du matériel résiduel de dissolution, c'est celui concernant les composés du fer, qui nous a apporté le moins d'information. Ces composés jouent un rôle important dans les sols examinés ; mais leur évolution est difficile à saisir, pour deux raisons essentielles. D'une part, ils existent probablement déjà sous forme partiellement altérée dans le résidu de dissolution de la roche-mère calcaire ; par ailleurs, la technique utilisée, pour déterminer l'état du fer : la méthode DEB, est imparfaite. Elle ne donne pas de renseignements satisfaisants pour certains types de sols. Les résultats obtenus sont les suivants.

Dans le cas général, on n'assiste pas à une ségrégation du fer, des argiles. Les deux constituants se comportent de la même manière. Il n'y a pas d'individualisation macroscopique du fer et, lorsque le lessivage entre en jeu, les indices d'entraînement des deux composés sont du même ordre de grandeur. Trois exceptions sont à noter ; mais il s'agit toujours de phénomènes mineurs, peu fréquents. L'hydromorphie provoque parfois, dans les horizons (B) ou B des sols fersiallitiques, avec ou sans réserve calcique, une ségrégation du fer mobile, sous forme de fines pellicules ferro-manganiques. Il faut aussi citer l'existence, dans les karsts très anciens, de concrétions ferrugineuses macroscopiques. C'est un héritage de pédogénèses, attribuées aux périodes sidérolithiques. Enfin, la podzolisation, qui consiste en une destruction des argiles, ne prend jamais une grande ampleur.

Une appréciation morphologique de l'état du fer est donnée par la couleur des horizons (B) ou B. D'une manière très générale, dans les sols relativement jeunes et soumis actuellement aux conditions humides des étages alpin, subalpin et montagnard, les horizons à couleur ocre (7,5 YR ; 10 YR) prédominent. Ils font partie du groupe de sols appelés jadis : "terra fusca" (ou lui sont apparentés). Par contre, dans les sols plus anciens et qui sont actuellement sous les conditions méditerranéennes, les horizons (B) ou B rouges (5YR, plus rarement 2,5 YR) sont plus fréquents. On note cependant, dans les fentes karstiques profondes, la présence d'horizons également ocres (7,5 YR) et généralement liés à des milieux plus humides et situés sous les horizons rouges. Des recherches récentes ont montré, que la couleur rouge est due à la présence de fer cristallisé deshydraté, tel que l'hématite, et aussi à la présence de "fer amorphe", qui est capable de masquer la couleur du fer cristallisé. La couleur ocre est due à la présence de fer cristallisé, hydraté, tel que la goethite, en absence de fer amorphe. Sous les conditions humides, le fer serait donc sous forme de goethite et sous les conditions plus sèches, il serait, soit sous forme d'hématite soit de goethite, dont la couleur ocre est masquée par la présence de fer amorphe, rouge.

L'état du fer a été examiné dans ce travail, par le rapport fer libre/fer total. Le "fer libre" est extrait à l'hydrosulfite de sodium, par la méthode DEB. Nous présenterons successivement les résultats positifs, obtenus par cette méthode et ceux, où elle n'a pas apporté les renseignements escomptés.

Les valeurs les plus élevées du rapport sont observées dans les horizons  $A_0/A_1$  des sols litho-calciques à mull-moder, sous les pelouses alpines et pseudoalpines et dans les horizons  $A_1$  des sols litho-calciques à moder, sous la pessière et la pinède à crochets. Elles sont situées entre 80 et 100 %.

Elles sont légèrement plus faibles, dans les horizons  $A_1$  des sols humo-calciques et des sols bruns calciques, sous la hêtraie, entre 60 et 90 %.

Le rapport baisse sensiblement dans les sols fersiallitiques, avec ou sans réserve calcique ; les valeurs sont de l'ordre de 60 à 70 %.

Enfin des chiffres relativement bas sont obtenus, dans les sols bruns calcaires, les rendzines, les rendzines brunifiées et les sols bruns calciques du midi de la France : de l'ordre de 40 à 50 %.

On assiste donc, à une certaine variation, à travers la séquence, du rapport fer libre/fer total. Dans l'interprétation, deux faits sont à mettre en évidence. D'une part, dans le rapport fer libre/fer total, un rôle important semble être joué, par le fer lié au complexe organo-minéral. En effet, dans les horizons organiques, très humifères, tels que les mull-moders et les mulls des sols litho-calciques, des sols humo-calciques et des sols bruns calciques, dans les étages humides, le rapport est toujours élevé, il peut atteindre des valeurs de 100 %. La méthode DEB semble extraire facilement le fer lié au complexe organo-minéral. Par ailleurs, on constate que la variation du rapport se superpose, d'une manière satisfaisante, à la variation du profil calcaire et calcique. Les valeurs les plus faibles du rapport, correspondent aux sols restés calcaires ou fortement calciques, dans le midi de la France ou aux horizons (B), encore carbonatés, des sols bruns calciques, sous les étages humides. De même, le rapport reste relativement bas, dans les sols fersiallitiques à réserve calcique.

Cependant, la méthode DEB n'a pas permis d'expliquer un certain nombre d'autres caractères pédogénétiques, pourtant également très importants.

Le premier cas à citer, concerne les sols fersiallitiques, avec ou sans réserve calcique. On constate, que dans ces sols, les rapports fer libre/fer total sont relativement bas. Il y a là, deux explications possibles. Ou bien, comme les argiles, les composés du fer ont été peu transformés. Cette explication est vraisemblable, pour les sols fersiallitiques à réserve calcique. Ou bien, dans ces sols très anciens, le fer a été immobilisé ; il se trouve actuellement, sous des formes difficilement extractibles. Cette dernière hypothèse est particulièrement valable, pour les sols fersiallitiques sans réserve.

Elle expliquerait aussi les résultats obtenus dans les sols, qui ont subi un lessivage. On constate, qu'entre les horizons éluviaux et illuviaux des sols fersiallitiques sans réserve calcique, il n'apparaît pas de différence, dans les rapports Fer libre/Fer total. Il en est de même, des sols lessivés ou

lessivés podzoliques. Si dans les horizons B de ces derniers, le rapport est parfois plus élevé, que dans les horizon A<sub>2</sub>, cette différence n'est jamais importante et elle n'est pas générale. Il semble que le fer, après illuviation, se trouve actuellement, dans les milieux plus calciques et non organiques des horizons B, sous des formes difficilement extractibles. Rappelons que dans ces mêmes milieux, les hydroxydes d'aluminium illuviés, sont restés dans les horizons B des sols lessivés podzoliques, sous forme "libre".

Citons aussi, que la méthode DEB n'a pas permis d'expliquer la différence de couleur entre les horizons (B) rouges, ocres ou bariolés des sols fersiallitiques à réserve calcique. La proportion de fer "libre", extraite par cette méthode, est identique dans les trois types d'horizons. L'extraction du "fer amorphe" selon SEGALEN, donne à ce sujet des résultats plus intéressants.

Enfin, une attention particulière a été attachée dans ce travail, à l'examen d'une éventuelle brunification actuelle des sols rouges anciens. Dans ce but, une comparaison, à partir d'un grand nombre d'échantillons, a été établie entre les rapports fer libre/fer total des horizons A<sub>1</sub> et A<sub>3</sub>, d'une part et ceux des horizons (B) rouges sous-jacents. Aucune différence significative n'apparaît. Deux explications sont possibles. Ou bien, la méthode DEB ne permet pas de saisir la différence ; ou bien, dans les horizons organiques, le fer entre pour une faible part dans la composition du complexe organo-minéral. Cette dernière hypothèse semble également vérifiée par les résultats concernant l'étude de la matière organique.

### 1.5 - LE LESSIVAGE

Le lessivage est un autre indice de pédogénèse, qui a été examiné dans ce travail, en particulier en ce qui concerne les argiles, l'aluminium libre et le fer libre. Les variations de Al total et de Fe total, à travers le profil, ont également été interprétées. Trois cas sont à considérer.

- Dans les sols lessivés ou "lessivés podzoliques", sous forêts, le processus entre en jeu, dès que la réserve calcique est épuisée et que le complexe absorbant est désaturé. On assiste d'abord, à une migration simultanée du fer total et des argiles. Le "ventre" de ces deux constituants s'établit dans les milieux plus calciques, au-dessus du front de décarbonatation. Dans les horizons éluviaux, la podzolisation entre rapidement en jeu.

L'aluminium libre migre alors à son tour. L'horizon B<sub>1</sub> est d'abord situé au dessus du B d'argiles et de fer, puis, dans les sols Al les plus évolués, tous les horizons B se superposent. Un rôle essentiel est joué ici, par la présence de la litière acide des résineux ou du Hêtre, générateurs de composés organiques complexants. En effet, sous les pelouses pseudoalpines ou alpines, en absence de litière, en présence du chevelu racinaire dense de la végétation herbacée, les sols ne sont pas ou faiblement lessivés. On assiste à la formation du front de décarbonatation, à la désaturation partielle du complexe absorbant ; mais les argiles et le fer ne sont pas lessivés ; dans les horizons de surface, l'aluminium est partiellement libéré, mais il n'est pas ou faiblement entraîné. Il s'agit là, de sols bruns acides. L'absence ou le faible développement du lessivage sont expliqués, par la biodégradation rapide des composés organiques solubles, sous l'effet rhizosphère.



- D'autres sols lessivés, très différents des précédents, sont constitués par les sols fersiallitiques sans réserve calcique. Ils s'en distinguent tout d'abord, par leur âge ; ceux-ci sont pour la plupart généralement très anciens, formés sur des surfaces karstiques très évoluées ; les sols lessivés précédents sont actuels, liés à des surfaces jeunes. Ils se distinguent aussi par leur morphologie. L'horizon A<sub>1</sub> est souvent épais, de l'ordre du mètre ou plus et l'horizon B, de couleur rouge ou bariolée, est très développé. Il résulte du lessivage, mais aussi, d'autres processus, tels que l'argilification et l'entraînement oblique. Ces sols sont souvent remaniés ; en particulier, l'horizon A<sub>2</sub> est fréquemment absent ou tronqué. Deux facteurs ont favorisé le lessivage. D'une part, les horizons éluviaux ou l'ensemble du profil sont dépourvus de réserve calcique. Ils sont sur calcaires siliceux. Sur calcaires compacts, où la réserve subsiste jusqu'en surface, les sols ne sont pas ou peu lessivés. Par ailleurs, ils sont développés sur des matériaux grossiers, riches en chailles et en silex, dont la présence accélère le processus. Comme pour l'ensemble des sols examinés, les argiles et le fer migrent ensemble. Les indices d'entraînement sont généralement très élevés. L'illuviation est également vérifiée par l'examen de la micromorphologie. A la différence des sols lessivés précédents, dans ceux examinés ici, l'aluminium est actuellement faiblement libéré dans les horizons éluviaux, il n'est pas entraîné en B.

- Un dernier cas à considérer, est celui des sols à réserve calcique. La présence de celle-ci s'oppose au lessivage. Ceci est parfaitement vérifié dans les sols de montagne. Un problème est posé, en ce qui concerne les sols fersiallitiques, à réserve calcique. On constate fréquemment, que les horizons (B) sont plus argileux, que les horizons A<sub>1</sub>. Par contre, les teneurs en fer total, à travers ces deux horizons, ne varient guère. La question qui se pose est de savoir, s'il s'agit d'un lessivage ou si la variation des argiles est explicable par d'autres mécanismes. Ce problème n'est pas résolu définitivement. Cependant il semble, que dans les horizons A<sub>1</sub>, il y ait une cimentation des argiles, en pseudo-limons ; elle n'a plus lieu dans les horizons (B). La matière organique ou le fer pourrait jouer le rôle de ciment. Ces horizons A<sub>1</sub> se trouvent en effet sous des conditions plus sèches que les horizons (B).

## 1.6 - LA MATIERE ORGANIQUE

Dans ce travail, une attention particulière a été portée à l'étude de la matière organique. Les objectifs fixés étaient de deux ordres. Il s'agissait d'abord d'examiner l'influence des conditions bioclimatiques, sur la vitesse de décomposition de la matière organique fraîche, sur le degré et la nature des liaisons des composés organiques, avec les argiles et enfin, sur le degré de polymérisation des acides humiques. Le deuxième objectif poursuivi était d'estimer l'influence de la dégradation de la végétation sur le profil organique. Cette interférence a été examinée dans l'ensemble des paramètres étudiés, mais elle ne s'est pas manifestée, dans chacun d'eux, d'une manière significative. Seul le profil organique est affecté par la dégradation de la végétation. A travers la séquence, six types d'humus ont été mis en évidence.

### 1.61 - LES HUMUS BRUTS

L'accumulation d'humus brut, à la surface du sol, est soumise à trois types de facteurs :

- La nature de la végétation joue un rôle important. Les litières acides (résineux et Hêtre) sont plus favorables que les litières basiphiles (Chêne pubescent, Chêne vert). Mais il convient aussi d'ajouter à cela, le rôle de la morphologie des feuilles. En particulier, les feuilles de Chêne vert, par leur caractère xéromorphe, se décomposent difficilement.

- Les conditions bioclimatiques interviennent dans la biodégradation. Celle-ci est freinée par les températures basses des étages de montagne, elle est favorisée, sous les conditions méditerranéennes.

- Enfin, un rôle important est joué par le substratum, sur lequel tombe la litière. La présence de terre fine, et en particulier de limons et d'argiles, au contact de la litière, favorise la décomposition de celle-ci. Par contre, les horizons Ao, se forment fréquemment, lorsque la litière est séparée du mull, par un masque de cailloux calcaires.

Dans les sols litho-calciques à mull-moder, les argiles sont peu abondantes, et les conditions bioclimatiques sont peu favorables à la biodégradation, pourtant l'horizon organique n'est pas du type humus brut. La nature basiphile ou neutrophile de la végétation herbacée et l'effet rhizosphère favorisent la décomposition rapide de la matière organique. Les humus bruts sont très fréquents, sous les résineux des étages subalpin et montagnard. Tous les facteurs favorisent leur accumulation. En particulier, dans ces karsts encore peu développés, le sol reste fréquemment très caillouteux, jusqu'en surface. Cependant, la présence d'horizons Ao n'est pas climacique ; en effet, lorsque la litière des résineux est en contact avec les argiles de décarbonatation, sa décomposition est rapide ; il ne se forme pas d'humus brut, la litière repose directement sur le mull. A travers la hêtraie-sapinière et la hêtraie mésophile, les horizons Ao se forment chaque fois, que la litière est séparée du mull, par un masque de cailloux. Ces humus bruts sont cependant là, moins épais, que sous la pessière et la pinède à crochets. Ce même schéma est vérifié, sous les étages collinéen et méditerranéen ; cependant, les horizons Ao sont là, beaucoup plus rares et ils sont toujours peu épais. Nous les avons appelés xéromoder. Le caractère xéromorphe des feuilles de Chêne vert contribue à leur formation. Il n'a pas été possible, de saisir une différenciation bien nette des caractères chimiques de ces humus bruts, à travers la séquence. Il semble, cependant que les xéromoders soient davantage saturés que les moders des étages plus humides. A travers tous ces horizons Ao, la matière organique fraîche est abondante. A l'extraction fractionnée, la proportion des composés facilement extractibles et mobiles est élevée. Mais une néoformation d'acides fulviques ou humiques peu polymérisés est probable.

### 1.62 - LES MULLS-MODERS

Ce type d'humus caractérise uniquement les sols litho-calciques à mull-moder des pelouses alpines et pseudoalpines. Il se forme dans des milieux tout à fait particuliers. Il se développe en absence d'argiles de décarbonatation. Celles-ci ne sont, en effet, pas suffisamment abondantes, pour permettre la formation d'un mull. Dans ces conditions, on assisterait, sous forêts, à l'accumulation de moder (sol litho-calcique à moder). Or la végétation herbacée, des pelouses alpines pseudoalpines, neutrophile ou basiphile, n'est pas génératrice d'humus brut. C'est là, la cause de l'originalité de ces mulls-moders.

Ses caractères particuliers se manifestent dans tous les paramètres. La structure des horizons organiques est particulière, pourtant les fractions densimétriques légères sont peu importantes. Les rapports C/N sont très bas : inférieurs à 10. L'effet rhizosphère, la nature de la végétation et l'insuffisance des argiles favorisent une biodégradation rapide. Dans ces milieux pourtant calciques, le fer semble jouer un rôle important, dans le complexe organo-minéral. D'une part, il se trouve sous forme libre de 80 à 100 %. Par ailleurs, l'extraction fractionnée montre, que les composés organiques sont difficilement solubles. Malgré les conditions bioclimatiques favorables, les composés organiques du fer ne sont pas entraînés, parce que les composés agressifs solubles ne se forment pas ou sont rapidement biodégradés.

### 1.63 - LES MULLS SOUS HUMUS BRUTS OU SOUS LITIÈRE ACIDE

Les autres types d'humus examinés sont tous des mulls, formés en présence d'argile. Parmi eux, ceux formés sous les humus bruts ou sous les litières acides des étages humides, ont des caractères différents, de ceux, qui sont sous les conditions méditerranéennes.

Un premier type de mull est celui des sols litho-calciques à moder. Il est situé, entre les mailles du squelette calcaire, sous l'humus brut. Il est abondamment percolé par les solutions organiques, qui proviennent du moder. Dans ces sols, les ions calciques sont énergiquement éliminés du profil et constamment renouvelés à partir de la réserve. Par ailleurs, le mull est appauvri en fer ; celui-ci semble être éliminé au-delà du profil. L'extraction fractionnée de la matière organique montre que la proportion des composés facilement mis en solution est élevée et que celle, qui est extraite à la soude, est plus réduite. La combinaison de ces résultats amène l'interprétation suivante. Les produits complexants, qui proviennent de l'humus brut, entraînent le fer au-delà du profil. Les composés organiques du fer restent solubles dans ces milieux proches de la saturation. Les quantités relativement peu importantes de fer, resté dans le complexe organo-minéral stable du mull, expliquent la faible proportion des composés humiques, extraits à la soude. Dans ce complexe organo-minéral, un rôle important serait joué par le calcium. Les combinaisons matière organique-calcium sont en effet plus facilement mises en solution, à l'extraction fractionnée. Enfin dans ces milieux plus agressifs, les composés organiques hydrosolubles jouent probablement aussi un rôle primordial, dans la mise en solution et dans l'élimination des ions calciques.

Un autre type de mull sous végétation acidiphile et sous les étages humides, est celui des sols bruns calciques sans humus brut. Par rapport aux mulls précédents, deux modifications importantes interviennent. D'une part, ces sols sont dépourvus d'humus brut ; la litière, en contact direct avec le mull, se décompose relativement vite. Par ailleurs, sous le mull, existe ici un horizon (B), argileux, saturé et souvent calcaire. Il est capable de capter certains composés qui proviennent des horizons supérieurs. Ces composés étaient, dans les sols précédents, éliminés du profil, le long des parois des fissures karstiques, restées vides. Dans ces sols, dépourvus d'humus brut, les solutions organiques sont moins agressives. Le fer et l'aluminium sont libérés en  $A_1$ , mais non entraînés en (B). Les rapports fer libre/fer total et Al libre/Al total sont moins élevés en (B) qu'en  $A_1$ . Ceci se répercute sur la nature de la matière organique ; par rapport aux composés humiques facilement extractibles, ceux dissous par la soude, sont ici relativement abondants. Dans ces sols, on met également en évidence une illuviation en (B), de composés humiques à poids moléculaire faible. En effet, ces horizons contiennent une faible quantité de matière organique facilement extractible et riche en acides fulviques. Il s'agit de composés humiques, qui proviennent des horizons supérieurs et qui ont été insolubilisés dans les milieux argileux, plus calciques ou calcaires des horizons (B). Ils sont facilement extractibles, parce que liés aux argiles essentiellement par le calcium, dont ces horizons sont saturés.

#### 1.64 - LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS LESSIVÉS FAIBLEMENT PODZOLIQUES ET DES SOLS BRUNS ACIDES

Toujours sous les étages bioclimatiques humides, un autre type de matière organique a été mis en évidence. Il s'agit des mulls acides, des sols lessivés faiblement podzoliques et des sols bruns acides. Ils diffèrent des précédents, par un certain nombre de caractères. Le premier concerne le profil organique. Précédemment, celui-ci était réparti profondément dans le sol. Les argiles et le calcium protégeaient la matière organique. Dans les sols lessivés faiblement podzoliques, le profil organique est plus appauvri, autant en  $A_1$  qu'en  $A_2$ . Il est du type mull eutrophe ou plus généralement mull acide. La protection des argiles et, en particulier, du calcium n'intervient plus.

On note, dans les horizons B de ces sols et surtout des "sols lessivés podzoliques", une illuviation de composés organiques. Elle se manifeste morphologiquement, par une auréole sombre autour des cailloux calcaires, qui subsistent en B. Dans l'extraction fractionnée, entre la matière organique des horizons  $A_1$ , et celle des horizons B, apparaît une différence essentielle. La proportion de l'humine est beaucoup plus importante en B, qu'en  $A_1$ . Ceci est facilement explicable : dans les horizons B, la matière organique se trouve en présence d'une quantité importante d'argiles, de fer libre et d'aluminium libre. Il se forme un complexe organo-minéral stable, qui est protégé de la biodégradation par les ions calciques. Cette matière organique, par son comportement, vis-à-vis de l'extraction fractionnée, a donc des caractères très différents de celle, également illuviale, des horizons (B) des sols bruns calciques.

### 1.65 - LA MATIERE ORGANIQUE DES SOLS SOUMIS AUX INFLUENCES MEDITERRANEENNES

La matière organique des sols méditerranéens est très différente de celle des sols sous les étages humides.

Considérons d'abord, les mulls des sols fersiallitiques à réserve calcique. Ils se développent sous Chêne vert et sous Chêne pubescent. D'abord, on note dans ces horizons, une proportion anormalement élevée de fractions densimétriques légères, en particulier sous Chêne vert. C'est la lenteur de la décomposition des feuilles qui en est responsable. Des débris végétaux sont mélangés au mull, par la faune du sol ; leur décomposition est lente parce qu'ils sont xéromorphes et, parce que le milieu est sec.

Le deuxième caractère de ces mulls, concerne l'extraction fractionnée. On constate que les composés humiques extraits au pyrophosphate sont relativement abondants ; la proportion de ceux extraits à la soude est relativement réduite. Rappelons aussi que ces horizons sont très calciques et que les rapports fer libre/fer total et Al libre/Al total sont faibles. L'interprétation en est la suivante : dans le complexe organo-minéral stable de ces mulls, un rôle important est joué par le calcium. Le fer interviendrait à un degré moindre. Dans ces sols, la matière organique serait du même type, que celle des sols bruns calcaires. Le fer, y jouerait un faible rôle. Il s'agirait ici d'un mull calcique.

Enfin, un dernier caractère de ces mulls, réside dans le haut degré de polymérisation de leurs acides humiques, vérifié par l'électrophorèse. En effet, dans ces sols, les acides humiques sont significativement moins mobiles, que ceux des autres types de matière organique. Deux explications sont possibles. L'alternance fréquente, de saisons humides avec des saisons très sèches, provoque la polymérisation des composés humiques. L'autre explication est d'ordre microbiologique. La décomposition de la litière est lente ; mais les composés humiques solubles, qui en proviennent, pendant les saisons humides, sont rapidement biodégradés. Les sucres ou d'autres composés organiques mobiles, à poids moléculaire faible, sont, au printemps ou en automne, rapidement minéralisés ou immobilisés dans le complexe organo-minéral stable. Dans ces sols, l'illuviation de composés humiques n'est plus mise en évidence ; dans l'entraînement du calcium et, à plus forte raison, du fer, le rôle de la matière organique est ici très réduit.

Sous les conditions méditerranéennes, on note la présence d'un autre type de matière organique, le cryptomull des sols fersiallitiques, sans réserve calcique. Comme dans les sols lessivés faiblement podzoliques, le profil organique est concentré à la surface de l'horizon A<sub>2</sub>, sur 3 à 8 cm. Au delà, il y a moins de 1 % de carbone dans le sol. Dans ces cryptomulls, les fractions densimétriques légères sont abondantes. Elles sont encore dues, au caractère xéromorphe des feuilles de Chêne vert. Un autre caractère important de ce type de matière organique, réside dans la forte liaison des composés humiques, avec la fraction minérale. On constate, en effet, que la

fraction humine est importante. La part extraite par la soude est également élevée ; les composés humiques dissous par le pyrophosphate sont relativement peu abondants. Dans ces milieux très percolants des horizons A<sub>2</sub>, les composés solubles sont rapidement entraînés, puis biodégradés pendant leur migration. Ceux, qui persistent dans l'horizon organique, sont fortement liés à la faible quantité d'argiles qui subsistent.

#### 1.66 - LA MATIÈRE ORGANIQUE ET LA DÉGRADATION DE LA VÉGÉTATION

La dégradation de la végétation forestière et l'installation de formations herbacées ou arbustives entraînent un certain nombre de modifications dans les caractères de la matière organique.

La première concerne les humus bruts. Ceux-ci sont fréquents sous les forêts des étages humides ; mais ils sont rarement conservés sous les pelouses de dégradation.

La seconde concerne le profil organique. La destruction de la forêt entraîne un appauvrissement du profil organique. Ceci se manifeste essentiellement dans les horizons de surface. Les horizons organiques profonds ne sont pas modifiés. Ces différences, dans le profil organique, entre sols forestiers et sols dégradés sont presque toujours vérifiées dans les étages humides. Sous les conditions méditerranéennes par contre, l'appauvrissement sous pelouses et l'enrichissement sous forêts, ne sont pas toujours vérifiés.

Une autre modification apparaît dans les valeurs de C/N. Celles-ci sont plus élevées sous forêts, que sous pelouses. Ce fait est bien connu ; la différence est due à la proportion plus importante, sous forêts, de la fraction densimétrique légère peu décomposée, et à la nature de la matière organique fraîche.

La dégradation de la forêt ne semble pas entraîner de modification dans la fraction densimétrique lourde des sols.

#### 1.7 - CONCLUSION

Examinons donc au terme de cette synthèse, s'il est possible de définir une zonalité de sols climaciques sur roches-mères calcaires.

Ce travail a montré que, indépendamment des conditions bioclimatiques actuelles, trois facteurs primordiaux orientaient l'évolution des sols, la lithologie, la géomorphologie et l'action des paléoclimats. Les matériaux, sur lesquels s'exerce actuellement la pédogénèse, sont, de ce fait, très hétérogènes et il n'est guère possible, de définir une zonalité des sols, à travers la séquence.

Dans cette grande diversité de sols, l'intérêt de ce travail était, de mettre en évidence l'évolution d'un certain nombre de paramètres, en relation avec les conditions bioclimatiques actuelles. Les facteurs actifs de la pédogénèse sont les plus favorables, sous les résineux des étages subalpin et montagnard. Ils sont encore propices, sous la hêtraie-sapinière et la hêtraie mésophile ; leur action est entravée, sous les pelouses alpines et pseudoalpines par l'effet rhizosphère. Enfin, sous les étages à influences méditerranéennes, les processus pédogénétiques sont actuellement peu actifs ; les sols évoluent lentement. L'examen d'un certain nombre de paramètres permet d'émettre l'hypothèse, que les sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France fonctionnent actuellement de la même manière que des sols bruns calcaires ou des sols bruns très calciques.

RESUME

ET

CONCLUSIONS GENERALES



## RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

L'objet de ce travail était d'étudier les phénomènes de pédogénèse, sur roches-mères calcaires, dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine, située dans le midi de la France et les Préalpes du Sud. Elle correspond aux étages bioclimatiques : méditerranéen, collinéen, montagnard, subalpin et alpin. Les renseignements ont été obtenus, à partir de l'examen de 400 à 450 profils.

1 - Dans l'étude des sols, sur roches-mères calcaires, un rôle primordial est joué par les caractères lithologiques. Par leur comportement vis-à-vis des autres facteurs de la pédogénèse, par l'abondance et la nature de leur résidu de décarbonatation, quatre types de roches-mères calcaires ont été distingués : les calcaires durs et purs, encore appelés calcaires compacts, les calcaires siliceux, les dolomies et les calcaires tendres.

2 - Sur calcaires, un rôle important est également joué par les paléopédogénèses. Sur les calcaires tendres, les surfaces sont jeunes et les sols sont actuels. En montagne, les surfaces karstiques ont été déblayées par des phénomènes glaciaires ou périglaciaires récents ; les sols sont également d'âge post-würm. Sous les conditions méditerranéennes, les surfaces karstiques sont très anciennes et les sols qu'elles ont conservés sont polygéniques. Les paléopédogénèses ont probablement joué un rôle important dans la formation du profil calcaire très évolué des sols fersiallitiques à réserve calcique et dans la différenciation très prononcée des horizons A<sub>2</sub> et B des sols fersiallitiques sans réserve calcique. Il convient aussi d'attribuer aux paléopédogénèses la prédominance, dans des profils cependant relativement rares, d'argiles du type kaolinite ou la présence de gibbsite et enfin, probablement aussi dans beaucoup de cas la couleur rouge des horizons B et (B).

3 - Sur roches-mères calcaires compactes, la dissolution est pelliculaire ; la décarbonatation est lente, mais les eaux sont encore agressives en profondeur. Le résidu de décarbonatation est peu abondant et les sols sont à réserve calcique, jusque dans les horizons de surface.

3.1 - Aux altitudes les plus élevées, dans les karsts encore très jeunes, les sols se développent, en absence ou en présence d'une faible quantité d'argiles de décarbonatation. Il se forme, sous les pelouses alpines et pseudoalpines, des sols litho-calcaiques humifères à mull-moder et à xéromor et sous les résineux des étages subalpins des sols litho-calcaiques humifères à moder ou à mor. A des altitudes plus basses, dans l'étage montagnard, le karst médian plus évolué, est comblé de matériel de remplissage. Celui-ci, partiellement d'origine périglaciaire, est encore fréquemment calcaire. Il détermine la répartition des sols. Dans ces karsts, de moyenne altitude, on trouve les sols humo-calcaiques, les rendzines brunifiées, les sols bruns calcaiques humifères ou modaux, les sols humo-calcaires, les rendzines

et les sols bruns calcaires. Dans les karsts méditerranéens prédominent les sols fersiallitiques à réserve calcique.

3.2 Tous ces sols ont une réserve calcique, mais la terre fine est généralement décarbonatée ; elle reste parfois faiblement calcaire dans les horizons A<sub>1</sub> recarbonatés des sols fersiallitiques. Dans les sols de montagne, l'élimination des ions calciques, au-delà du profil, est active ; ils sont cependant constamment renouvelés à partir de la réserve. Même sous des conditions très favorables à l'acidification, ces sols ne sont en montagne jamais désaturés au-delà de S/T = 80 %. Sous les conditions méditerranéennes, la décarbonatation actuelle est réduite ; on assiste, dans la terre fine de tous les horizons, à un certain encombrement en calcium, son élimination au-delà du profil se fait difficilement.

3.3 Des étages humides, aux étages méditerranéens, à travers la séquence sur calcaires compacts, les minéraux argileux sont de moins en moins altérés et la proportion d'aluminium libre par rapport à l'aluminium total est de moins en moins importante. Les mécanismes de la dégradation sont partout identiques ; il s'agit d'une vermiculitisation. Cependant, le stade vermiculite n'est atteint, que dans les conditions les plus favorables, à l'altération : dans les horizons très organiques et partiellement désaturés des sols sous résineux des étages bioclimatiques humides. Dans les sols restés saturés, la vermiculitisation s'arrête à des stades intermédiaires, du type interstratifiés. Enfin, dans les sols fersiallitiques, à réserve calcique, saturés, du midi de la France, les argiles, généralement du type illite, sont conservées ; leur altération n'entre pas en jeu et les rapports Al libre/Al total restent bas.

3.4 Les paramètres examinés, concernant les composés du fer, n'ont pas apporté des renseignements aussi intéressants que ceux, concernant les argiles et l'aluminium libre. Le problème de la nature des composés du fer dans ces sols, n'a pas été résolu dans ce travail. On constate que les rapports Fer libre/Fer total sont relativement élevés, dans les étages bioclimatiques humides. En particulier, la méthode DEB semble extraire préférentiellement le fer, qui est lié aux complexes organo-minéraux. Par contre, dans les sols fersiallitiques du midi de la France, ces rapports sont relativement faibles. Dans ces sols, le fer est resté ou est devenu difficilement extractible par la méthode DEB. Il est partiellement cristallisé sous forme de goethite. Le fer libre n'a pas permis d'expliquer la couleur rouge ou ocre des horizons (B) ou B à travers la séquence.

3.5 Ces sols, à réserve calcique, ne sont généralement pas, ou peu, lessivés. Cependant, dans les sols fersiallitiques du midi de la France, on constate, que les horizons (B) sont fréquemment plus argileux que

les horizons  $A_1$ . Pour le fer, cette différence n'est pas observée ou à un degré moindre. Il semble, qu'il s'agisse là, davantage d'une cimentation des argiles en limons, dans les horizons  $A_1$  que d'un lessivage.

3.6 La matière organique de ces sols a été caractérisée par l'extraction fractionnée des composés humiques et par l'examen du comportement des acides humiques à l'électrophorèse.

L'accumulation d'humus brut est conditionnée par les facteurs bioclimatiques, mais aussi géomorphologiques. Les horizons  $A_0$  se forment chaque fois, que la litière est séparée des argiles de décarbonatation par un masque de cailloux calcaires. Par contre, la litière, même celle des résineux des étages subalpin et montagnard, se décompose relativement vite, sans formation d'humus brut, lorsqu'elle est en contact direct avec le mull. Les conditions bioclimatiques et la nature de la végétation interviennent, dans l'épaisseur des humus bruts. Ceux-ci sont épais sous les résineux des étages de montagne. Sous les conditions méditerranéennes, ils sont peu développés et rares : ce sont alors des xéromoders.

Les sols litho-calcaiques à mull-moder des pelouses alpines et pseudoalpines ont un type de matière organique tout à fait particulier. Il est formé, en absence ou en présence d'une faible quantité d'argiles de décarbonatation, indispensables à la formation du mull, sous une végétation herbacée basiphile ou neutrophile qui, par son effet rhizosphère, accélère la décomposition de la matière organique et s'oppose à la formation d'un humus brut. Ces mulls-moders sont pauvres en fractions densimétriques légères et leurs composés humiques sont difficilement extractibles. Dans leur complexe organo-minéral stable, le fer semble jouer un rôle important.

Toujours dans ces sols à réserve calcique, un autre type de matière organique est constitué par les mulls, qui sont sous les humus bruts et sous la litière acide des étages bioclimatiques humides. A travers ces mulls, un entraînement de composés organiques solubles est probable. Sous les humus bruts, ils sont capables de complexer le fer et de l'éluvier. Sous des conditions moins favorables, ils jouent probablement encore un rôle important, dans l'élimination des ions calciques.

Enfin, les mulls calciques des sols fersiallitiques à réserve calcique, du midi de la France, sont caractérisés par une absence d'illuviation de composés solubles, par un haut degré de polymérisation des acides humiques et enfin par une proportion relativement importante des composés humiques extraits au pyrophosphate. Dans les complexes organo-minéraux stables de ces mulls, le calcium jouerait un rôle important. Dans ces complexes, le fer interviendrait à un degré moindre que dans les mulls précédents.

3.7 Concernant le fonctionnement actuel des horizons supérieurs des sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France, l'hypothèse suivante est proposée : ces horizons se comporteraient, actuellement, de la même manière, que des sols bruns calcaires ou très calciques. Le profil calcaire est hérité. Mais ceci reste, dans l'état actuel de nos connaissances, une simple hypothèse. Elle semble être vérifiée, par la plupart des paramètres examinés dans ce travail. Les indices, permettant d'estimer le fonctionnement de ces sols, pendant des périodes antérieures et en particulier aux phases interglaciaires, sont insuffisants. Mais il est vraisemblable, que les phénomènes d'hydrolyse dans ces sols aient toujours été réduits, puisque des argiles, telles que l'illite, y sont conservées, alors que sous des étages plus humides, elles sont en voie de vermiculitisation.

4 - Sur calcaires siliceux, comme précédemment, la dissolution est pelliculaire. Mais ces roches sont plus riches en résidu. Celui-ci s'accumule à la surface du karst et les sols sont dépourvus de réserve calcique, soit dans les horizons de surface, soit jusqu'à des profondeurs plus importantes. Sous les conditions méditerranéennes, les sols, qui se sont développés sur ces roches-mères, sont du type fersiallitique sans réserve calcique. Ce sont des sols anciens, morphologiquement très évolués. L'absence de la réserve calcique et les milieux souvent très percolants ont provoqué un entraînement intense du fer et des argiles. Cependant, dans la formation des horizons B, d'autres phénomènes, tels que l'entraînement oblique ou l'argilification ont vraisemblablement eu lieu. Ces sols diffèrent des sols lessivés des étages bioclimatiques humides, par un certain nombre de caractères. Dans les sols fersiallitiques, les complexes absorbants restent davantage saturés. Les indices d'entraînement du fer et des argiles sont généralement plus importants. Mais, l'aluminium est actuellement faiblement libéré en  $A_1$  et  $A_2$ . Il n'est pas entraîné. Dans ces sols, pourtant morphologiquement très développés, les argiles ne sont pas très altérées, Le stade vermiculite n'est en général pas atteint. Dans les horizons B, les minéraux tendent vers la montmorillonite. Enfin, on ne note jamais de migration de composés organiques.

5 - A travers la séquence sur dolomies, un seul type de sol, distinct de ceux sur calcaires compacts, mérite d'être retenu : la rendzine dolomitique. Elle est sableuse, sa capacité d'échange est réduite et de ce fait son pH est particulièrement élevé : entre 8 et 9.

6 - L'altération des calcaires tendres est différente de celle des calcaires karstiques. Ces roches sont poreuses et la dissolution des carbonates est accélérée. Les eaux sont rapidement neutralisées et elles ne sont plus agressives en profondeur. Ces calcaires tendres, sensibles à l'érosion, forment des surfaces jeunes

et les sols qui y sont liés sont actuels.

Sous les conditions méditerranéennes c'est l'érosion et les remaniements qui l'emportent sur la pédogénèse. Les sols restent carbonatés, jusque dans les horizons de surface. Dans ces milieux, des argiles très altérables telles que l'attapulgite subsistent.

Sous les étages bioclimatiques humides de montagne, on assiste à la formation d'un front de décarbonatation. Le sol, situé au-dessus de celui-ci, est sans réserve calcique, décarbonaté dans la terre fine, désaturé et acide. Sous les pelouses alpines et pseudo-alpines, se forment des sols bruns acides. Le fer et l'aluminium sont partiellement libérés mais ces composés et les argiles ne sont pas, ou faiblement, entraînés. Par l'effet rhizosphère, les composés organiques complexants sont rapidement biodégradés. Sous forêts : pinède à crochets, pessière, hêtraie-sapinière et hêtraie mésophile, les argiles sont rapidement entraînées. Les horizons lessivés sont en voie de podzolisation. Le fer libre et, en particulier, l'aluminium libre sont entraînés en B. Il s'agit de sols lessivés faiblement podzoliques de "sols lessivés podzoliques". On assiste également, à l'illuviation de composés humiques, qui sont immobilisés dans les milieux plus calciques des horizons B, sous des formes difficilement extractibles et protégées de la biodégradation par le calcium.

BIBLIOGRAPHIE

- ARNAL H., 1969 - Le cailloutis calcaire de Verargues (Hérault) et son altération pédologique au Quaternaire. Note présentée à la réunion extraordinaire de l'A.F.E.Q. 19 avril 1969.
- AVIAS J., 1968 - Le karst de France. C.E.R.H., Université de Montpellier. 64 p.
- BACH R., 1950 - Die Standorte jurassischer Buchenwaldgesellschaften mit besonderer Berücksichtigung der Böden (Humuskarbonatböden und Rendzinen). Ber. Schweiz. Bot. Gesellsch., Zürich, Bd. 60, 51-152.
- BACH R., KUOCH R., IBERG R., 1954 - Wälder der schweizer Alpen im Verbreitungsgebiet der Weissstanne. II Entscheidende Standortsfaktoren und Böden. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen XXX. Band, 261-322.
- BARON G., 1960 - Sur la synthèse de la dolomite. Application au problème de la dolomitisation. Rev. inst. Fr. du pétrole et Ann. des combustibles liq., XV, 1, 3-68. Thèse Fac. Sc. Paris.
- BARRY J.P., 1960 - Contribution à l'étude de la végétation de la région de Nîmes. Année biol., Fr., 3, 36, 7-12, 312-548.
- BAUER F., 1958 - Verkarstung und Bodenzerstörung in den Osterreichischen Kalkalpen. Zemljiste i biljka God. VIII, N°1-3 Januar-Dezember, 123-136.
- BENEVENT F., 1926 - Le climat des Alpes Françaises. Mémorial de l'Office National de Météorologie de France. N°14, Paris, 435 p.
- BIROT P., ROGLIC J., NICOD M., DUFAURE J., 1966 - Le relief calcaire. "Les cours de Sorbonne". Géographie, Paris, 238 p.
- BLANC J.J., 1961 - Réflexion sur les anciens karsts de la Provence. Bull. Mus. d'Anthropol. préhist. Monaco. N°8, 5-8.
- BLANC J.J., 1964 - Recherches sur les sédiments argileux des grottes dans le sud-est de la France. Bull. Mus. d'Anthropol. préhist. Monaco. N° 11, 5-35.
- BLANCHARD R., 1956 - Les Alpes occidentales. Essai de synthèse. T. 7. B. Arthaud, Paris 6°, 605 p.

- BLUM W., 1968 - Sedimentogene und pedogene. Entwicklungsmerkmale von Böden auf Karbonatgestein - am Beispiel des südlichen Oberrheingrabens. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen. Institut für Bodenkunde der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. Heft 1, 184 p.
- BLUM W., MAUS H., 1967 - Mineralogische Untersuchungen an Sedimentgesteinen und Böden des Südlichen Oberrheingrabens und der Schwarzwaldvorbergzone. I Mitteilung. Mineralbestand der Gesteine. Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. 57, 175-202.
- BONIFAY E., 1962 - Les terrains quaternaires dans le sud-est de la France. Imprimerie Delmas, Bordeaux. 194 p.
- BORNAND M., 1969 - Les sols rouges du confluent Rhône-Isère. Sci. du Sol, Fr., 2, 3-28.
- BOTTNER P., 1970 - La matière organique des principaux types de sols sous l'étage bioclimatique du Chêne vert dans le midi de la France. Sci. du Sol, Fr., 1, 3-18.
- BOTTNER P., LOSSAINT P., 1967 - Etat de nos connaissances sur les sols rouges du Bassin Méditerranéen. Sci. du Sol, Fr., 1, 49-80.
- BOTTNER P., BOUKHRIS M., 1969 - Les sols sur dolomie dans le sud de la France. Bull. Ass. fr. Et. Sol, N°5, 21-28.
- BOUKHRIS M., 1967 - Sur l'écologie et la nutrition des végétaux croissant sur dolomie dans le sud de la France. Thèse de spécialité, Fac. Sc. Montpellier, 104 p.
- BOULAINÉ M.J., 1967 - Problèmes posés par les sols rouges méditerranéens. Bull. Ass. Géographes fr. Mai, 1-10.
- BOURDIER F., 1961 - Le Bassin du Rhône au quaternaire. Thèse doctorat es sciences. Paris, tome I, 364 p.
- BRAUN-BLANQUET J., 1936 - La forêt d'Yeuse languedocienne. 147 p. Imprimerie Mari-lavit.
- BRAUN-BLANQUET J., 1964 - Pflanzensoziozoologie Springer-Verlag Wien. New-York. 865 p.
- BRISSE H., 1966 - Etude Phyto-écologique de la commune de Montauban-sur-Ouvèze (Drôme). Doc. N°25 du C.E.P.E. - C.N.R.S. B.P. 1018 - 34. Montpellier, 353 p.
- BRUCKERT S., DOMMERGUES Y., 1966 - Etude expérimentale de la biodégradation de deux complexes organo-ferriqués dans un sol à mor et à mull. Sci. du Sol, Fr., 2, 65-76.

- BRUCKERT S., DOMMARGUES Y., 1968 - Importance relative de l'immobilisation physico-chimique et de l'immobilisation biologique du fer dans les sols. *Sci. du Sol, Fr.*, 1, 19-28.
- BRYDON J.-E., RICE H.-M., 1965 - Use of intercept method in determining the calcite - dolomite ration for rating agricultural limestones. *Agron. J., U.S.A.*, 57, 3, 283-285.
- CADEL G., OZENDA P., TONNEL A., 1963 - Feuille de St Bonnet. Doc. pour la carte de la Vég. des Alpes. I, 47-90.
- CADILLON M., 1970 - Les sols des Causses du Larzac. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Fac. Sc. Montpellier 219 p.
- CAMEZ T., 1962 - Etude sur l'évolution des minéraux argileux dans les sols des régions tempérées. Mem. Serv. Carte Geol. Als. Lorr., 20, 90 p.
- CARBIENER R., 1963 - Remarques sur un type de sol encore peu étudié : le ranker cryptopodzolique de l'étage subalpin des massifs hercyniens français. *C.R. Ac. Sc. Paris T.* 256, 977-979.
- CARO P., 1965 - La chimie du gaz carbonique et des carbonates et les phénomènes hydrogéologiques karstiques. *Chronique d'hydrogéologie*, 7, septembre, 51-78.
- CARVALHO VASCONCELLOS F., 1967 - Les sols bruns et rouges calcaires du Sud du Portugal. - *C.R. Conf. Sols Médit., Madrid* 325-330.
- CIRIĆ N., 1967 - Characteristics of soil formation on limestone and principles of limestone classification. *Soviet Soil Science*, 1, 57-64.
- COINTEPAS J.P., - Les sols rouges et bruns méditerranéens de Tunisie. *C.R. Conf. Sols Médit., Madrid*, 187-194.
- CORBEL J., 1954 - Les phénomènes karstiques dans les Grands Causses. *Rev. Géogr. Lyon*, 287-316.
- CORBEL J., 1956 - Le karst du Vercors. *Rev. Géogr. Lyon*, 221-241.
- CORBEL J., 1957 a - Les karsts alpins de haute altitude. *Rev. Géogr. Lyon*, 135-158.
- CORBEL J., 1957 b - Les karsts alpins de moyenne altitude. *Rev. Géogr. Lyon*, 43-56.
- CORBEL J., 1959 a - Erosion en terrain calcaire. *Ann. Géogr. Fr.* N°366 LXVIII<sup>e</sup> année, mars-avril, 98-120.



- CORBEL J., 1959 b - Les grandes cavités de France et leurs relations avec les facteurs climatiques. Ann. Spéléol. Fr. tome XIV, fasc. 1 et 2, 31-47.
- CORBEL J., 1961 - Sur la dissolution du calcaire. Rev. Géogr. de l'Est. N°4, oct. - déc. Tome 1, 363-365.
- COULET E., 1968 - Caractères et problèmes du karst languedocien. Actes de la Réunion Internat. Karstol. Languedoc-Provence 8-12 juillet 15-36.
- C.P.C.S. 1967 - (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols). Classification des sols. Edition 1967. E.N.S.A. de Grignon Fr., 87 p.
- DACHARY M.C., 1967 - Contribution à l'étude des sols rouges du Sahel d'Alger. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Paris, ronéo 76 p.
- DACHARY M.C., 1969 - Observations sur les sols rouges et la mise en place de poches dans un calcaire tendre du Sahel algérois. Bull. Ass. fr. Et. Sol, N°5, 29-36.
- DAN J., YAALON D.H., 1966 - Trends of soil development with time in the mediterranean environments of Israel. Conf. Sols médit., Madrid, 139-145.
- DELHUMEAU M., 1969 - Etude des sols de la région de Mouila en relation avec l'évolution karstique du Schisto-calcaire de la NYANGA. Cah. O.R.S.T.O.M. Pedol. Fr., Vol. VII, N°3, 417-434.
- DESAUNETTES J.R., 1966 - Sol rouge méditerranéen en altitude. C.R. Conf. Sols Médit., Madrid, 301-305.
- DIMAS D., 1969 - Contribution à l'étude des terres rouges méditerranéennes. Thèse Fac. Sci. Toulouse, 94 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1950 - Recherches sur l'évolution des sols calcaires en Lorraine. Ann. l'E.N.E.F. Tome XII, Fasc. I, 99-153.
- DUCHAUFOR Ph., 1966 - Le problème du climax et l'évolution des sols. Oecol. Plant. N°2, Tome I, 165-174.
- DUCHAUFOR Ph., 1968 - Evolution des sols, essai sur la dynamique des profils. Masson et Cie, Paris 6<sup>e</sup>, 91 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1970 - Précis de pédologie. Masson et Cie. Paris 6<sup>e</sup>, 481 p.
- DUCHAUFOR Ph., BARTOLI Ch., 1966 - Note sur l'évolution des sols calcimorphes de l'étage montagnard humide. Sci. du Sol, Fr., N°2, 29-40.

- DUCHAUFOR Ph., DOMMARGUES Y., 1963 - Etude des composés humiques de quelques sols tropicaux et subtropicaux. Sols afr. Fr., vol. VIII, n°1, 5-39.
- DUCHAUFOR Ph., JACQUIN F., 1963 - Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse. Ann. Agron., Fr., 14, 885-918.
- DUCHAUFOR Ph., JACQUIN F., 1966 - Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. Bull. E.N.S.A. Nancy, t.VIII, 1, 4-24.
- DUCHAUFOR Ph., SOUCHIER B., 1965 - Note sur un problème de classification : podzolisation chimique et différenciation du profil. Pédologie, Belg., XV, 2, 143-153.
- DUCHAUFOR Ph., SOUCHIER B., 1966 - Note sur les critères de classification des sols lessivés. C.R. Conf. Sols Médit. Madrid, 401-405.
- DUCHAUFOR Ph., SOUCHIER B., 1968 - Note sur la migration sélective de l'aluminium dans les sols cryptopodzoliques. C.R. Acad. Sci. Paris, T. 266. 204-206.
- DUGRAND R., 1964 - La garrigue Montpelliéraine. P.U.F. Paris 6<sup>e</sup>, 292 p.
- DUPIAS G., MOLINIER R., CORRE J.J., TRABAUD L., 1966 - Carte de la végétation de la France au 1/200 000. Feuille de Montpellier. C.N.R.S., PARIS.
- DUTHION C., CHRETIEN J., 1966 - Evolution des caractères analytiques de quelques sols forestiers en cours de podzolisation dans les basses Vosges. Sci. du Sol, Fr., 2, 15-18.
- DUTIL P., 1968 - Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. Sci. du Sol, Fr., N°2, 79-92.
- EMBERGER L., 1943 - Les limites de l'aire de végétation méditerranéenne en France. Bull. Soc. Hist. Nat. de Toulouse, 77, 97-124.
- EMBERGER L., 1955 - Une classification biogéographique des climats. Rev. Trav. Fac. Sci. Montpellier, Botanique, 7, 3-43.
- EMBERGER L., GAUSSEN H., KASSAS I., PHILIPPIS, 1962 - Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne. 2 cartes échelle 1/5 000 000, notice explicative, série recherches sur la zone aride. UNESCO - FAO.
- ESPIAU P., 1966 - Dosage des carbonates répartis dans les fractions argileuses et limoneuses des terres. Méthode applicable à l'analyse de série. Doc. du C.E.P.E. - C.N.R.S. B.P. 1018, 34 - Montpellier . 10 p.

- ESPIAU P., LARGUIER M., 1967 - Méthodes et techniques des analyses de terres. Doc. n°24 du C.E.P.E. - C.N.R.S., B.P. 1018, 34 - Montpellier, 158 p.
- FAURE Ch., GILOT J. Cl., 1968 - Etages subalpin et alpin de la Feuille de Vif. Doc. pour la carte de la Vég. des Alpes, VI. 38. Saint Martin d'Hères (France), 7-70.
- FEDOROFF N., 1968 - Genèse et morphologie des sols à horizon B textural en France atlantique. Sci. du Sol, Fr., 1, 29-66.
- FLORET Ch., 1962 - Contribution à l'étude phytogéographique et écologique de la commune de Vesc (Préalpes Drômoises) Document N° 12 du C.E.P.E. C.N.R.S. B.F. 1018, 34 - Montpellier. 236 p.
- FOLSTER H., MEYER B., KALK E., 1963 - Parabraunerden aus primärcarbonathaltigem gem. Würm-Löss in Niedersachsen. II Profilbilanz der zweiten Folge bodengenetischer Teilprozesse : Tonbildung Tonverlagerung Gefügeverdichtung Tonumwandlung. Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde. Dtsch., 100 Band, Heft. 1, 1-12.
- FRANC DE FERRIERE P.J.J., 1961 - Etude des minéraux argileux des sols du périmètre syndical d'irrigation de Montbreton à Pessac-sur-Dordogne. Bull. Ass. fr. Et. Sols 54-68.
- FREI E., 1944 - Morphologische, chemische und kolloidchemische Untersuchungen subalpiner Weide- und Waldböden der Rendzina- und Podsol-Serie. Dissertation an der E.T.H. Landwirtsch. Abteilung, Zürich. Veröffentlicht in : Ber. Schweiz. Bot. Gesellsch., 5944, Bd. 54, 267-346.
- FREI E., JUHASZ P., BACH R., 1966 - Bodenkarte der Schweiz 1/1000000 Erläuterungen zur Karte und zur Systematik der Böden der Schweiz. Schweiz. Landwirtschaft. Forschung, Band V, Heft 3 : 4, 537-551.
- GAL M., 1966 - Clay mineralogy in the study of the genesis of terra rossa and rendzina soil originating from calcareous rocks. Intern. Clay Conf. Jerusalem. I, 199-207.
- GARNIER M., 1967 - Climatologie de la France. Selection des données statistiques. Mémorial de la Météorologie Nationale, N°50, Paris 7<sup>e</sup>, 293 p.
- GAUSSEN H., (non daté) - Carte de la pluviosité annuelle des Alpes, du Bassin du Rhône et de la Corse au 1/500 000. Ministère des Travaux Publics, Paris.

- GEBHARDT H., MEYER E., SCHEFFER F., 1966 - Zwischenschichtbelegung und Expansionsverhalten von Dreischicht Tonmineralen in CO<sub>3</sub>Ca gepufferten Hydrogencarbonat milieu kalkreicher Lockersedimentböden. Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde, Dtsch., 114 Band, Heft 2, 90-100.
- GEBHARDT H., KING M.T., MEYER B., 1969 - Mineralogisch- chemische Untersuchungen zum Prozess der Rubefizierung in Kalkstein-Rotlehm und fossillem Laterit in Nordhessen. Gottinger Bodenkundliche Berichte, 9, 65-124.
- GIGNOUX M., 1960 - Géologie stratigraphique. Masson et Cie Paris 6<sup>ème</sup> 759 p.
- GILOT J. Cl., 1967 - Note écologique sur divers groupements à Rhododendron ferrugineum L., se développant sur substrat calcaire : exemple des Préalpes occidentales françaises. Oecol. Plant. Tome 2, N°2, 139-161.
- GILOT J. Cl., DOMMERGUES Y., 1967 - Note sur le lithosol calcaire à mor de la station subalpine de la RCP 40. Rev. Ecol. Biol. Sol, T. IV, 3, 357-383.
- GOBERT J., OZENDA P., THIEBAUT M., TONNEL A., 1963 - Feuille de la Chapelle-en-Vercors, Doc. pour la Carte de la Vég. des Alpes, I. 25-46.
- GOBERT J., OZENDA P., TONNEL A., 1964 - Carte de la végétation de la France au 1/200 000 Feuille de Gap, C.N.R.S. Paris.
- GOBERT J., PAUTOU G., 1969 - Feuille de Vaison-la-Romaine. Contribution à l'étude botanique du Ventoux. Doc. pour la Carte de la Vég. des Alpes, VII. 145-194.
- GODRON M., 1971 - Un essai d'approche probabiliste de l'écologie des végétaux. (A paraître).
- GRACANIN Z., 1956 - Die Beziehungen zwischen Roterden und Waldgesellschaften des kroatischen Karstgebietes. VI<sup>e</sup> Congrès Int. Sci. du Sol, Paris, V, 5, 547-551.
- GRACANIN Z., 1960 - Das dinarische Karstgebiet in bodenkundlicher und allgemeinerbiologischer Betrachtung. Bull. scient. Yougoslavie. Tome 5, N°4, 118.
- GRACANIN Z., 1963 - Zur Nomenklatur der Bodenhorizonte erodierter skeletthaltiger Böden. Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde Dtsch., 101, 1, 42-48.
- GUILLERM J.L., 1969 - Relations entre la végétation spontanée et le milieu dans les terres cultivées du Bas-Languedoc. Thèse de spécialité (écologie), Fac. des Sc. Montpellier, 165 p.

- HETIER J.M., TALDY Y., 1969 - Présence de vermiculite-AL, montmorillonite-AL et chlorite-AL et leur répartition dans quelques sols des Vosges.- C.R. Acad. Sci., Paris, 268-D, p. 259-261.
- JACQUIN F., 1961 - Contribution à l'étude d'humus naturels par électrophorèse sur papier. Bull. Ec. Nat. Sup. Agron. Nancy, Tome III, Fasc. II, 106-113.
- JUNG J., 1963 - Précis de pétrographie. Masson et Cie, éditeurs, Paris 6<sup>e</sup>, 314 p.
- KALK E., MEYER B., 1960 - Progressive Bio-Opal Quarz Umwandlung bei der Terra-Fusca Entstehung aus Kalkgestein. Zeiss Mitt. Dtsch. 2, 3, Heft, 103-112.
- KHAN D.H., 1960 - A pedological study of some rendzina red brown soils, and terra rossa : mechanical composition and chemical characteristics. Pakist. J. For. 10, 133-148.
- KLINGE H., PUFFE D., SCHEFFER F., WELTE E., 1962 - Die Rendzinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland) 3. Mitteilung : Humus und Stickstoff in den Rendzinen unter verschiedenen Standortbedingungen. Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde Dtsch., 96, 46-62.
- KUBIENA W.L., 1943 - Beiträge zur Bodenentwicklungslehre (Entwicklung und Systematik der Rendzinen). Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde Dtsch., 29, 108-116.
- KUBIENA W.L., 1944 - Beiträge zur Bodenentwicklungslehre der Kalksteinbraunlehme (Terra Fusca) als Glied der Entwicklungsserie der mitteleuropäischen Rendzine. Z. Pflanzenernähr. Düngung Bodenkde Dtsch., 35, 226-245.
- KUBIENA W.L., 1953 - Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 392 p.
- KUZNIKI F., 1968 - Les propriétés et la typologie des sols formés sur roches crétacées siliceuses décalcifiées de Roztocze, par rapport à la caractéristique et à la classification génétique des rendzines. Roczniki Gleboznawcze Soil Science annual. T.XV, 2, résumé, 406-407.
- LAMOTTE M., 1967 - Initiation aux méthodes statistiques en Biologie. Deuxième édition. Masson et Cie, Paris 6<sup>1e</sup>, 144 p.
- LAMOUREUX M., 1965 - Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat méditerranéen humide (Liban). Cah. O.R.S.T.O.M. Pédol. Vol. III, N°1, 21-41.

- LAMOUREUX M., 1966 - A propos de la formation de sols rouges méditerranéens sous climat humide et subhumide du Liban. C.R. Conf. Sols Médit. Madrid, 295-296.
- LAMOUREUX M., 1967 - Contribution à l'étude de la pédogénèse en sols rouges méditerranéens. Sci. du Sol, Fr., N°2, 55-85.
- LAMOUREUX M., 1968 - Les sols bruns méditerranéens et les sols rouges partiellement brunifiés du Liban. Cah. O.R.S.T.O.M., pédol., vol. VI, N°1, 63-93.
- LAMOUREUX M., AUBERT G., 1966 - Les sols bruns méditerranéens formés sur calcaire dur au Liban, C.R. Conf. Sols Médit., Madrid, 203-206.
- LAMOUREUX M., PAQUET H., PINTA N., MILLOT G., 1967 - Notes préliminaires sur les minéraux argileux des altérations et des sols méditerranéens du Liban. Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. 20, 277-292.
- LAMOUREUX M., SEGALEN P., 1969 - Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban. Sci. du Sol, Fr., 1, 63-76.
- LEPOUTRE B., 1967 - Présentation d'un profil de rendzine dolomitique à l'excursion au Maroc du Congrès de Pédologie Méditerranéenne. Tome III. Cah. Rech. agron., Maroc N° 25. 73-83.
- LESZCZYNSKA E., 1966 - Relict soils of the red soil type as well as brown and typical rendzina soils originating from jurassic limestones and marls of the Krakow-Wielun Jura and the western part of the mezozoic mantle of the swietokrzyskie mountains. Roczniki Nank Rolniesy ck, Tome 120, série D ; résumé, 126-129.
- LEUENBERGER R., 1950 - Beitrag zur Kenntnis der Humuskarbonatböden und Rendzinen im Schweizer Jura. Dissertation an der E.T.H. Zürich, Mitt. der Agrik. Inst. E.T.H. Zürich. 85 p.
- LONG G., VISONA L., MARI J., 1958 - La végétation du domaine de Coulondres (Hérault), étude du SCGV, N°6, C.E.P.E., B.P. 1018, 34 - MONTPELLIER. 48 p.
- LOSSAINT P., 1959 - Etude expérimentale de la mobilisation du fer des sols sous l'influence des litières forestières. Ann. Agro. 10, 493-542.
- LOSSAINT P., 1967 - Etude intégrée des facteurs écologiques de la productivité au niveau de la pédosphère en région méditerranéenne dans le cadre du P.B.I. - Programme et description des stations. Oecol. Plant., 2, N°4, 341-366.

- LOSSAINT P., RAPP M., 1969 - Répartition de la matière organique et cycle du carbone dans les groupements forestiers et arbustifs méditerranéens sempervirents : *Quercus ilex* et *Quercus coccifera*. Colloque sur la productivité des écosystèmes forestiers. UNESCO - P.B.I., Bruxelles. (sous presse).
- LOSSAINT P., WAREMBOURG F., BOTTNER P., 1969 - Note sur l'existence d'un sol ocre podzolique à horizon B<sub>2</sub> noir alumineux dans les Cévennes méridionales siliceuses C.R. Acad. Sci. Paris, t 269, 1621-1624.
- MARCELIN P., 1942 - Sur le problème des terres rouges. Bull. Soc. Lang. de Géogr. XIII, 1, 1-9.
- MARCELIN P., 1947 - Observations sur des terres et des sols en région méditerranéenne. I, Terres et sols en Costières. Chartonier et Alméras, Nîmes, 146 p.
- MARCELIN P., 1950 - Phénomènes du vent et du froid au quaternaire supérieur dans la région nîmoise. Soc. Lang. de Géogr. deuxième série, T. XXI, 2<sup>e</sup> fasc. Juillet-décembre, 85-122.
- MARCELIN P., RUTTEN P., 1959 - Loess et lapiaz aux environs de Nîmes. Bull. Soc. d'Et. des Sci. Nat. de Nîmes. Tome XLVIX, année 1946 - 60, 53-56.
- MARRES P., 1935 - Les Grands Causses. Etude de géographie physique et humaine. Arrault et Cie., imprimeurs, Tours, T.I, 208 p.
- MASSEPORT J., 1960 - Le Diois, les Barronies et leur avant pays Rhodanien. Etude morphologique, Imprimerie Allier, Grenoble, 478 p.
- MATHON Cl. Ch., 1952 - Etude phytosociologique de la Montagne de Lure. Thèse, Fac. Sci. Toulouse, 171 p.
- MEINECKE F., 1966 - Das Vorkommen von Terra Rossa und Gelblehm auf dem Massenkalk im Sauerland. Z ; deutsch. Geol. Ges, Band. 115, Januar, 715-726.
- MEYER B., KALK E., FOLSTER H., 1962 - Parabraunerden aus primärkarbonathaltigen Würm-Löss in Niedersachsen. I Profil bilanz der ersten Folge bodengenetischer Teilprozesse : Entkalkung Verbraunung Mineralverwitterung. Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkde, Dtsch. 99 (144) Band, Heft 1, 37-54.
- MILLOT G., 1964 - Géologie des argiles - Masson et Cie Paris 6<sup>ie</sup> 499 p.
- MOLINIER R., 1952 - Les massifs de l'Etoile et de N.D. des Angès de Mimet (Bouches du Rhône). Bull. Mus. Hist. Nat. de Marseille, 12, 15-20.

- MOLINIER R., 1955 - La végétation des collines de Vitrolles et du plateau d'Arbois. Bull. Mus. Hist. Nat. de Marseille, 15, 97-115.
- MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUSINANG C., 1962 - Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. Ann. Agro. Fr., 13, (1), 55-63.
- MONTURIOL E., GUEREA A., 1966 - Présence et évolution de la terra fusca en Espagne. C.R. Conf. Sols Médit. Madrid. 277-278.
- MUCKENHAUSEN 1962 - Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. D.L.G. Verlag Frankfurt (Main), 147 p.
- MUGNIER C., 1965 - Les karstifications antépliocènes et plioquaternaires dans les Bauges, la Chartreuse septentrionale et les chaînons jurassiens voisins. Deuxième partie. Ann. spéléol., XX, fasc. 2, 167-208.
- MULLER J., 1963 - Sols bruns méditerranéens et leur évolution. Premiers résultats d'une étude de l'île de Port-Cros. Sci. du Sol, Fr., n° 1, 47-65.
- NICOD J., 1967 - Recherches morphologiques en Basse Provence calcaire. Etudes et Travaux de "Méditerranée". N°5, 556 p.
- OZENDA P., 1966 - Perspectives nouvelles pour l'étude phytogéographique des Alpes du Sud. Doc. pour la Carte de la Vég. des Alpes. IV, 198 p.
- OZENDA P., PORTECOP J., 1966 - Séries de végétation des Alpes du Sud occidentales. Doc. pour la Carte de la Vég. des Alpes. 1 carte au 1/400 000.
- PAQUET H., 1969 - Evolution des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. Thèse Fac. Sc. Strasbourg. 348 p.
- PORTECOP J., 1967 - Note climatologique sur la carte de Grenoble 1/100 000. Doc. pour la Carte de la Vég. des Alpes V, 119-126.
- PRIESNITZ K., 1966 - Zur Frage der Lösungsfreudigkeit von Kalkgesteinen in Abhängigkeit von der Lösungsfläche und ihrem Gehalt an Magnesiumkarbonat. Abh. Karst - und Höhlenkunde Reihe A, H2, München.
- RAPP M., 1970 - Contribution à l'étude du bilan et de la dynamique de la matière organique et des éléments minéraux biogènes dans les écosystèmes à Chêne vert et à Chêne kermès du midi de la France. Thèse Doct. ès Sci. Fac. Sc. Montpellier. 204 p.
- RAVIKOVITCH S., 1967 - Soils of the Mediterranean zone of Israël and their formation. C.R. Conf. Sols Médit. Madrid 1966, 163-171.



- RAVIKOVITCH S., PINES F., 1967 - Mountain rendzina soils in Israël Ann. Edafol. Agrobiol. Esp. 26, N°14, 573-584.
- RICHARD J.L., 1961 - Les forêts acidophiles du Jura. Commission phytogéographique de la société helvétique des sciences naturelles. Editions Hans Huher, Berne, 164 p.
- RITTER J., 1969 - Les groupements végétaux <sup>des</sup> étages subalpins et alpins du Vercors méridional. Essai d'interprétation statistique. Thèse Fac. Sc. d'Orsay, Université de Paris, 126 p.
- RITTER J., BOTTNER P., 1971 - Les relations sol-végétation au niveau des pelouses de l'étage subalpin supérieur du Vercors méridional. (A paraître).
- ROCH E., 1958 - Les bauxites du midi de la France : leur origine. Rev. Gén. Science. T. LXV, N°5, 151-156.
- ROGLIC J., 1957 - Quelques problèmes fondamentaux du karst. Inf. Géog. 1, 1-12.
- ROTINI O.T., LOTTI G., BALDACCI P.V., 1964 - Recherches sur les argiles de la terra rossa italienne. La Ricerca Scientifica, Anno 35, série 2, 59-65.
- ROUSSET C., 1967 - Essai de mise au point sur les terra rossa provençales. C.R. Acad. Sc. Paris, T. 264, série D, 1257-59.
- RUELLAN A., 1966 - Les sols isohumiques subtropicaux au Maroc C.R. Conf. Sols Médit. Madrid, 81-89.
- RUELLAN A., 1970 - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes. Les sols à profil calcaire différencié des Plaines de la Basse Moulouya. Thèse Fac. Sc. Strasbourg 482 p.
- RUTTEN P., BOUTEYRE G., VIGNERON J., 1963 - Pédogénèse et géomorphologie dans le Bas-Rhône Languedoc, leurs conséquences agrologiques. Sci. du Sol, Fr., 1, 87-102.
- SAUVAGE Ch., 1960 - Recherches géobotaniques sur les subéraies marocaines. Tr. Inst. Sci. Chérifien. Série Bot., 22, 462 p.
- SAUVAGE Ch., 1964 - Le Quotient pluviothermique d'Emberger, son utilisation et la représentation géographique de sa variation au Maroc. Ann. Serv. de Phsique du Globe et de Météorologie de l'Institut Scientifique Chérifien, T. 20.
- SCHACHTSCHABEL P., SCHROEDER P., 1953 - Untersuchungen über die Nebenbestandteile von Kalkstein verschiedener geologischer Herkunft Z. Pflanzenernährung, Düngung Bodenkd., Dtsch. 61, (106) 193-203.

- SCHEFFER F., WELTE E., MEYER B., 1960 - Die Rendzinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland) 1. Mitteilung. Genese und Verbreitungsbedingungen der Rendsinen. - Z. Pflanzenern. Düng. Bodenk. 90, 18-36.
- SCHEFFER F., WELTE E., MEYER B., 1962 - Die Rendzinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland) 2. Mitteilung ; Fraktur, Nichtcarbonatgehalt und spezifische Auflösungsgeschwindigkeit des Kalkgesteins als bestimmende Größen der Bodenentwicklungsgeschwindigkeit. - Z. Pflanzenern. Düng. Bodenk. 98, 1-18.
- SCHROEDER D., 1952 - Über die nichtkarbonatischen Bestandteile von Weissjuralkalken. Z. Pflanzenernährung, Düngung Bodenkde, Dtsch., 57, 215-244.
- SEGALEN P., 1968 - Note sur une <sup>méthode de</sup> détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. O.R.S.T.O.M., Pédol. Vol. VI, N°1, 105-126.
- SEGALEN P. LEAL SILVA J.N., 1969 - Le fer, le manganèse, l'aluminium et la silice facilement extractibles dans les sols tropicaux à sesquioxides. Cah. O.R.S.T.O.M., Pédol. Vol. VII, N°3, 287-310.
- STEINBERG M., 1967 - Quelques remarques sur les sédiments recueillis dans des poches de dissolution des calcaires jurassiques du détroit poitevin. Mém. h. série Soc. Géol. de France N°4, 81-82.
- TEIXEIRA BESSA M.R. 1967 - Sols méditerranéens du Portugal méridional. - C.R. Conf. Sols Médit., Madrid 1966, 173-186.
- THOMANN C., 1963 - Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols, méthode au pyrophosphate de sodium. Cah. O.R.S.T.O.M., Pédol., N°3, 43-72.
- THOMANN C., 1964 - Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest africain. cah. O.R.S.T.O.M. Pédol. Vol. II, fasc. 3, 43-79.
- TRABAUD L., 1962 - Monographie phytosociologique et écologique de la région de Grabels-Saint-Gély-du-Fesc. Thèse 3<sup>ième</sup> cycle Fac. Sc. Montpellier 131 p. (ronéo).
- VALETON I., 1966 - Sur la genèse des gisements de bauxite du Sud-Est de la France. Bull. de la Soc. de géolog. de France. 7<sup>e</sup> série, Tome VIII, N°5, 685-700.
- VIGNERON J., BOUTEYRE G., RUTTEN P., 1966 - Cartographie et chronologie des paléosols du Bas-Languedoc. Discussion sur la place des sols rouges dans cette chronologie. C.R. Conf. Sol Médit. Madrid, 297-299.

- WAREMBOURG F., 1969 - Sur la dynamique des sols dans les Cévennes méridionales siliceuses. Thèse de spécialité. Fac. Sci. Montpellier. 142 p.
- WEINMANN, 1966 - Terra calcis in Griechenland. C.R. Conf. Sols Médit., Madrid, 319-323.
- WERNER J., 1958 - Zur Kenntnis der Braunen Karbonatböden (Terra Fusca) auf der Schwäbischen Alb. Doctorat, Technischen Hochschule Stuttgart, 91 p.
- WERNER J., 1964 - Grundzüge einer regionalen Bodenkunde des südwestdeutschen Alpenvorlandes. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Band 17, 91 p.
- WOLDSTEDT P., 1962 - Zur Altersfragen der mitteleuropäischen Terrae calcis. Eiszeitalter und Gegenwart, Band 13, 157-177.
- YAALON D.H., 1954 - Calcareous soils of Israel, the amount and particle size distribution of the calcareous material. Israël Expl. J. Tome 4, 278-285.
- YAALON D.H., 1955 - Clays and some non carbonate minerals in limestones and associated soils of Israël. Bull. Res. Coun. of Israël, Vol. 5 B, 161-167.
- YAALON D.H., NATHAN Y., KOYUMODJISKI H., DAN J., 1966 - Weathering and catenary differentiation of clay minerals in soils on various parent materials in Israël. Int. Clay Cent. JERUSALEM, 1, 187-198.
- ZOTTL H., 1965 a - Zur Entwicklung der Rendsinen in der Subalpinen Stufe. I. Profilmorphologie. Z. Pflanzenernährung, Düngung Bodenkde, Dtsch. 110 Band, Heft 2, 109-115.
- ZOTTL H., 1965 b - Zur Entwicklung der Rendsinen in der Subalpinen Stufe. II. Chemisch- biologische Dynamik. Z. Pflanzenernährung, Düngung Bodenkde, Dtsch. 110 Band, Heft 2, 115-126.
- ZOTTL H., 1966 - Kalkböden der Alpen. Jahrbuch des Vereins zum Schutze der Alpenpflanzen und- Tiere. 31 Band, 8000 München 2, Linprunstrasse 37/IVr.

## REMERCIEMENTS

Il me reste, avant de clore ce travail, une tâche très agréable, celle de remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à sa réalisation : mes maîtres, mes collègues et mes amis que je côtoie depuis mes sept années de présence au C.N.R.S. à Montpellier.

J'exprime d'abord ma profonde reconnaissance au regretté Monsieur L. EMBERGER et à Monsieur SAUVAGE, Directeur du C.E.P.E.. C'est au centre que M. EMBERGER a créé et que M. SAUVAGE dirige que ces recherches ont été effectuées.

Que Monsieur LOSSAINT, chef de la section d'Eco-Pédologie du C.E.P.E. trouve aussi ici l'expression de toute ma gratitude. C'est lui qui inspira ce travail et anime l'équipe de recherche dans laquelle il a été réalisé. Je le remercie de l'aide intellectuelle et matérielle qu'il m'accorda.

Je remercie Monsieur AUBERT, Président du Comité Technique de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M., du grand soin qu'il porta à l'examen du manuscrit de ce travail et de m'avoir fait l'honneur de participer au jury de ma thèse.

Ma gratitude va aussi à Monsieur DUCHAUFOR, Directeur du Centre de Pédologie de Nancy. Il m'a enseigné la pédologie et a su intéresser un certain nombre de ses élèves à cette passionnante discipline. Je le remercie des conseils qu'il me donna dans l'orientation et la réalisation de ce travail.

Je remercie Monsieur LEMEE, Professeur à la Faculté des Sciences d'Orsay, de m'avoir parrainé au C.N.R.S. et d'avoir porté beaucoup d'intérêt à mes recherches. Je le remercie aussi de l'enseignement qu'il m'a donné à Strasbourg dans le cadre du certificat de phytosociologie et de pédologie.

Je suis également reconnaissant à Monsieur AVIAS, Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier, d'avoir bien voulu prendre part à mon jury.

J'adresse mes remerciements à l'équipe de Monsieur MILLOT, Professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg, qui m'enseigna la géologie ; à Hélène PAQUET et à Yves TARDY, pour les services qu'ils m'ont rendu dans l'étude des argiles.

Je remercie aussi Monsieur JACQUIN, Professeur à l'E.N.S.A. de Nancy, pour les conseils qu'il m'a donnés en ce qui concerne la caractérisation de la matière organique.

J'exprime ma gratitude à Monsieur OZENDA, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble. Ses suggestions dans le domaine de la Phytosociologie m'ont été très utiles.

Que Messieurs ESPIAU et LARGUIER, chimistes au C.E.P.E., et le personnel du service d'analyses de séries qu'ils dirigent, soient également assurés de ma reconnaissance. Leur concours a amplement facilité l'accomplissement de ce travail.

La collaboration des botanistes et phytosociologues, BRISSE et THIAULT, ingénieurs au C.E.P.E. et RITTER, maître-assistant à la Faculté des Sciences de Besançon, a également été très efficace.

Le concours de Messieurs GODRON et ROMANE et le service de mécanographie du C.E.P.E. m'ont aussi été très précieux.

Enfin, j'ai le plaisir de remercier tout le personnel du C.E.P.E. Ils ont tous, de près ou de loin, participé à la réalisation de ce travail. Je n'oublierai pas mes collègues et amis que je côtoie tous les jours à la section d'Eco-Pédologie : Mesdames BIASCAMANO, DI-GIUSTO, GUIDA, LAFONT, MERLE et TALLENDIER, et Messieurs BILLES, BOUKHRIS, CORTEZ, ETTEHAD, HELWANI, PRIOTON et RAPP. Je leur dis toute mon amitié.

A N N E X E

LOCALISATION DES PROFILS  
TYPES DE VEGETATION

MASSIF DU VERCORS, MONTS DU MATIN

Carte I.G.N. au 1/50 000, feuille de La-Chapelle-en-Vercors, Charpey, vif.

- Sol minéraux bruts sur éboulis dépourvus de végétation ou avec *Allium narcissiflorum*, *Héracléum minimum* ou *Cystopteris fragilis* :

N° des profils	Coordonnées Lambert et altitude		
0096	x = 851,8 ;	y = 289,3 ;	alt. = 1900 m
0110	x = 847,8 ;	y = 298,4 ;	alt. = 1520 m
0127	x = 851,9 ;	y = 290,9 ;	alt. = 1950 m
0128	x = 851,9 ;	y = 290,9 ;	alt. = 1950 m
0130	x = 851,8 ;	y = 292,0 ;	alt. = 2000 m
0131	x = 851,8 ;	y = 292,0 ;	alt. = 2000 m
0132	x = 851,8 ;	y = 292,0 ;	alt. = 2000 m
0228	x = 852,3 ;	y = 292,2 ;	alt. = 1900 m
0229	x = 852,3 ;	y = 289,2 ;	alt. = 1900 m

- Sols lithocalciques humifères à mull-moder sous pelouses alpines et pseudoalpines à *Festuca glauca*, *Teucrium montanum*, *Anthyllis montana*, *Androsace villosa*, *Gentiana angustifolia*, *Globularia cordifolia*, *Gesleria coerulea* et *Carex sempervirens* :

1009	x = 848,2 ;	y = 289,1 ;	alt. = 1550 m
1017	x = 848,7 ;	y = 288,9 ;	alt. = 1550 m
1022	x = 848,3 ;	y = 288,0 ;	alt. = 1560 m
1023	x = 848,5 ;	y = 285,0 ;	alt. = 1600 m
1025	x = 848,6 ;	y = 284,9 ;	alt. = 1650 m
1026	x = 847,8 ;	y = 287,2 ;	alt. = 1600 m
1043	x = 848,6 ;	y = 288,0 ;	alt. = 1530 m
1045	x = 848,5 ;	y = 288,2 ;	alt. = 1550 m
1051	x = 847,3 ;	y = 302,0 ;	alt. = 1350 m
1080	x = 848,8 ;	y = 290,9 ;	alt. = 1500 m
1081	x = 848,8 ;	y = 288,9 ;	alt. = 1600 m
1095	x = 844,2 ;	y = 286,1 ;	alt. = 1580 m
1103	x = 850,0 ;	y = 288,5 ;	alt. = 1600 m
1104	x = 852,2 ;	y = 290,2 ;	alt. = 2341 m
1117	x = 842,0 ;	y = 287,6 ;	alt. = 1640 m

- Sols lithocalciques humifères à moder ou à mor sous pessières avec *Vaccinium myrtillus*, *Melampyrum pratense* et mousses.

2010	x = 847,3 ;	y = 289,4 ;	alt. = 1920 m
2032	x = 846,4 ;	y = 290,6 ;	alt. = 1490 m
2033	x = 847,3 ;	y = 289,4 ;	alt. = 1490 m
2035	x = 846,2 ;	y = 289,5 ;	alt. = 1500 m

N° des profils	Coordonnées Lambert et altitude		
2050	x = 847,5 ;	y = 299,7 ;	alt. = 1420 m
2069	x = 846,2 ;	y = 291,0 ;	alt. = 1400 m
2072	x = 845,8 ;	y = 290,6 ;	alt. = 1400 m
2089	x = 846,8 ;	y = 299,1 ;	alt. = 1210 m
2109	x = 847,8 ;	y = 298,7 ;	alt. = 1370 m
- Sols humiques carbonatés sous pessières à <i>Vaccinium myrtillus</i> avec <i>Melampyrum pratense</i> et mousses :			
2036	x = 846,3 ;	y = 294,5 ;	alt. = 1450 m
sous hêtraies avec <i>Vaccinium myrtillus</i> :			
3016	x = 844,2 ;	y = 290,3 ;	alt. = 1120 m
3061	x = 828,7 ;	y = 294,0 ;	alt. = 1290 m
sous pelouses à <i>Bromus erectus</i> et <i>Festuca duriuscula</i> :			
3008	x = 840,4 ;	y = 292,2 ;	alt. = 1080 m
3052	x = 843,5 ;	y = 300,5 ;	alt. = 940 m
- Rendzines brunifiées sous pelouses à <i>Festuca duriuscula</i> , <i>Bromus erectus</i> et <i>Thymus serpyllum</i> :			
3097	x = 824,2 ;	y = 288,0 ;	alt. = 1000 m
3122	x = 819,1 ;	y = 284,6 ;	alt. = 860 m
- Rendzines sous pelouses à <i>Bromus erectus</i> avec <i>Anthyllis vulneraria</i> :			
4031	x = 842,7 ;	y = 290,0 ;	alt. = 930 m
4091	x = 839,8 ;	y = 294,0 ;	alt. = 1080 m
4107	x = 843,5 ;	y = 299,8 ;	alt. = 920 m
4108	x = 848,3 ;	y = 301,0 ;	alt. = 1350 m
- Sols bruns calciques modaux sous pessières avec <i>Adenostyles glabra</i> , <i>Asperula odorata</i> et <i>Oxalis acetosella</i> :			
3070	x = 846,2 ;	y = 291,0 ;	alt. = 1440 m
3074	x = 845,9 ;	y = 290,8 ;	alt. = 1430 m
3087	x = 847,0 ;	y = 299,0 ;	alt. = 1270 m
3088	x = 847,3 ;	y = 298,7 ;	alt. = 1280 m
3102	x = 846,5 ;	y = 291,8 ;	alt. = 1490 m
3141	x = 851,3 ;	y = 291,7 ;	alt. = 1670 m
sous hêtraies avec <i>Asperula odorata</i> , <i>Sanicula europaea</i> , <i>Prenanthes purpurea</i> , <i>Actaea spicata</i> :			
3002	x = 838,8 ;	y = 298,5 ;	alt. = 1210 m
3003	x = 840,2 ;	y = 298,8 ;	alt. = 1030 m
3056	x = 824,9 ;	y = 293,0 ;	alt. = 1190 m
sous pelouses à <i>Festuca duriuscula</i> , <i>Bromus erectus</i> , <i>Brachypodium pinnatum</i> , <i>Arrhenaterum elatius</i> avec <i>Anthyllis vulneraria</i> , <i>Thymus serpyllum</i> :			
3007	x = 839,5 ;	y = 291,4 ;	alt. = 1090 m
3014	x = 840,6 ;	y = 299,3 ;	alt. = 1020 m
3021	x = 839,5 ;	y = 294,0 ;	alt. = 1080 m
3048	x = 826,8 ;	y = 297,3 ;	alt. = 1030 m



## N) des profils

## Coordonnées Lambert et altitude

3055	x = 824,7 ;	y = 292,7 ;	alt. = 1070 m
3058	x = 825,0 ;	y = 292,2 ;	alt. = 1070 m
3067	x = 824,4 ;	y = 291,1 ;	alt. = 1030 m
3075	x = 827,2 ;	y = 296,5 ;	alt. = 1070 m
3078	x = 828,7 ;	y = 299,3 ;	alt. = 830 m
3090	x = 839,2 ;	y = 293,0 ;	alt. = 1090 m
3266	x = 824,4 ;	y = 291,1 ;	alt. = 1030 m

- Sols bruns calciques humifères sous hêtraies à *Sanicula europaea*, *Actaea spicata*, avec *Prenanthes purpurea* ;

3001	x = 840,0 ;	y = 287,7 ;	alt. = 1170 m
3004	x = 840,3 ;	y = 297,9 ;	alt. = 1040 m
3060	x = 827,8 ;	y = 294,5 ;	alt. = 1200 m
3062	x = 827,0 ;	y = 292,8 ;	alt. = 1270 m
3085	x = 829,5 ;	y = 291,6 ;	alt. = 1350 m
3092	x = 841,2 ;	y = 289,0 ;	alt. = 1220 m
3099	x = 828,3 ;	y = 292,7 ;	alt. = 1320 m
3106	x = 845,2 ;	y = 311,0 ;	alt. = 850 m

sous pelouses à *Festuca duriuscula* avec *Thymus serpyllum*  
ou à *Bromus erectus* avec *Anthyllis vulneraria* :

3068	x = 821,3 ;	y = 291,2 ;	alt. = 1050 m
3076	x = 827,5 ;	y = 296,3 ;	alt. = 1070 m

- Sols bruns acides, sous pelouses alpines ou pseudoalpines  
avec *Carex sempervirens*, *Globularia nudicaulis* ou sous  
pelouses à *Nardus stricta* ou sous landes à *Vaccinium myr-*  
*tillus* :

8011	x = 852,0 ;	y = 288,9 ;	alt. = 1940 m
8012	x = 841,2 ;	y = 287,2 ;	alt. = 1950 m
8024	x = 848,7 ;	y = 285,0 ;	alt. = 1630 m
8027	x = 852,5 ;	y = 289,5 ;	alt. = 1900 m
8044	x = 848,7 ;	y = 287,9 ;	alt. = 1580 m
8049	x = 847,8 ;	y = 301,8 ;	alt. = 1280 m
8082	x = 848,6 ;	y = 286,5 ;	alt. = 1610 m
8094	x = 844,2 ;	y = 286,2 ;	alt. = 1440 m
8100	x = 828,7 ;	y = 291,6 ;	alt. = 1320 m
8116	x = 842,0 ;	y = 287,2 ;	alt. = 1600 m
8118	x = 841,0 ;	y = 288,9 ;	alt. = 1410 m
8119	x = 841,2 ;	y = 287,2 ;	alt. = 1430 m
8120	x = 841,3 ;	y = 286,8 ;	alt. = 1430 m

- Sols lessivés faiblement podzoliques ou sols lessivés "pod-  
zoliques" sous sapinières ou hêtraies-sapinières à *Vaccinium*  
*myrtillus* avec *Melampyrum pratense* ou à *Calluna vulgaris* :

9034	x = 847,2 ;	y = 289,4 ;	alt. = 1560 m
9037	x = 845,7 ;	y = 291,6 ;	alt. = 1490 m
9038	x = 845,7 ;	y = 291,6 ;	alt. = 1490 m
9071	x = 846,0 ;	y = 290,8 ;	alt. = 1430 m

N° des profils	Coordonnées Lambert et altitude		
9101	x = 846,5 ;	y = 292,0 ;	alt. = 1360 m
9142	x = 850,0 ;	y = 291,6 ;	alt. = 1620 m
9157	x = 836,1 ;	y = 301,2 ;	alt. = 1040 m
9158	x = 836,1 ;	y = 301,1 ;	alt. = 1040 m

- Sols lessivés faiblement podzoliques, sols lessivés "podzoliques" sous hêtraies à *Vaccinium myrtillus* avec *Melampyrum pratense*.

- Sol lessivés sous hêtraies avec *Melica uniflora* et *Elymus europaeus* ou avec *Luzula nivea* :

9005	x = 838,8 ;	y = 285,8 ;	alt. = 1350 m
9020	x = 827,7 ;	y = 294,3 ;	alt. = 1300 m
9059	x = 828,6 ;	y = 295,0 ;	alt. = 1200 m
9083	x = 827,8 ;	y = 294,0 ;	alt. = 1280 m
9084	x = 827,7 ;	y = 294,2 ;	alt. = 1280 m
9086	x = 830,1 ;	y = 293,0 ;	alt. = 1300 m
9105	x = 845,2 ;	y = 311,0 ;	alt. = 850 m
9121	x = 841,0 ;	y = 287,6 ;	alt. = 1350 m
9145	x = 822,5 ;	y = 297,0 ;	alt. = 710 m
9152	x = 832,1 ;	y = 293,3 ;	alt. = 1260 m

- Sols lessivés faiblement podzoliques, sols lessivés "podzoliques" sous pelouses à *Arrhenaterum elatius* avec *Festuca rubra* ou sous landes à *Calluna vulgaris* avec *Brachypodium pinnatum* et *Briza media* :

9019	x = 822,5 ;	y = 291,2 ;	alt. = 1070 m
9057	x = 824,6 ;	y = 292,8 ;	alt. = 1120 m
9077	x = 828,0 ;	y = 296,3 ;	alt. = 1050 m
9093	x = 840,7 ;	y = 290,0 ;	alt. = 1110 m
9154	x = 835,1 ;	y = 298,5 ;	alt. = 1100 m
9161	x = 841,0 ;	y = 298,5 ;	alt. = 1150 m

MONT-VENTOUX, MONTAGNE DE LURE, PLATEAU DE

St CHRISTOL, MONTS DU VAUCLUSE

Carte I.G.N. au 1/50 000 feuilles de VAISON-la-ROMAINE, SEDERON, SISTERON, SAULT-de-VAUCLUSE.

- Sols minéraux bruts d'érosion : litho-régosols sur éboulis avec *Carex rupestris* :

N° des profils	Coordonnées Lambert		Altitude
0015	x = 836,8 ;	y = 212,0 ;	alt. = 1720 m
0016	x = 836,2 ;	y = 212,3 ;	alt. = 1820 m
0019	x = 836,9 ;	y = 211,4 ;	alt. = 1550 m
0028	x = 838,2 ;	y = 210,6 ;	alt. = 1450 m
0029	x = 838,2 ;	y = 210,6 ;	alt. = 1450 m
0031	x = 838,2 ;	y = 210,0 ;	alt. = 1400 m

- Sols lithocalciques humifères à mull-moder sous pelouses à *Sesleria coerulea*, *Poa alpina* avec *Juniperus communis* :

1034	x = 834,7 ;	y = 212,5 ;	alt. = 1450 m
1035	x = 834,5 ;	y = 212,6 ;	alt. = 1450 m
1036	x = 834,1 ;	y = 212,6 ;	alt. = 1450 m

- Sols bruns calciques sous hêtraies à *Sesleria coerulea* :

3017	x = 837,6 ;	y = 210,6 ;	alt. = 1380 m
3020	x = 837,1 ;	y = 210,7 ;	alt. = 1400 m

- Sols bruns calciques sous pelouses à *Brachypodium pinnatum*, *Bromus erectus*, *Festuca glauca* avec *Lavandula officinalis* :

3023	x = 853,9 ;	y = 196,0 ;	alt. = 870 m
3024	x = 852,8 ;	y = 196,0 ;	alt. = 900 m
3045	x = 857,9 ;	y = 193,0 ;	alt. = 820 m
3066	x = 850,0 ;	y = 196,5 ;	alt. = 1000 m

- Sols bruns calcaires sous taillis de Chêne pubescent :

5040	x = 855,7 ;	y = 185,8 ;	alt. = 650 m
------	-------------	-------------	--------------

- Sols bruns calcaires sous pelouses à *Bromus erectus*, à *Festuca glauca* avec *Lavandula officinalis* :

5038	x = 854,8 ;	y = 185,3 ;	alt. = 560 m
5067	x = 850,1 ;	y = 197,5 ;	alt. = 1010 m
1152	x = 851,1 ;	y = 208,2 ;	alt. = 970 m

- Sols lessivés faiblement podzoliques, sols lessivés "podzoliques" sous pelouses à *Nardus stricta* :

8006	x = 833,0 ;	y = 213,7 ;	alt. = 1430 m
8062	x = 878,8 ;	y = 207,8 ;	alt. = 1730 m
8064	x = 878,2 ;	y = 207,8 ;	alt. = 1730 m
9205	x = 834,2 ;	y = 213,6 ;	alt. = 1430 m

- Sols fersiallitiques à réserve calcique sous taillis de  
Chêne pubescent :

N° des profils	Coordonnées Lambert		Altitude
6003	x = 856,6 ;	y = 194,9 ;	alt. = 810 m
6027	x = 853,3 ;	y = 185,1 ;	alt. = 460 m
6041	x = 856,6 ;	y = 193,3 ;	alt. = 850 m
6046	x = 858,0 ;	y = 193,2 ;	alt. = 830 m
6069	x = 858,8 ;	y = 192,5 ;	alt. = 730 m

- Sols fersiallitiques sans réserve calcique, sous pelouses à  
Bromus erectus avec Lavandula officinalis :

7001	x = 855,3 ;	y = 195,4 ;	alt. = 820 m
7042	x = 853,1 ;	y = 196,5 ;	alt. = 950 m
7050	x = 850,7 ;	y = 205,0 ;	alt. = 830 m
7051	x = 850,7 ;	y = 205,0 ;	alt. = 830 m
7059	x = 859,9 ;	y = 199,9 ;	alt. = 950 m
7201	x = 855,3 ;	y = 195,4 ;	alt. = 820 m

- Sols fersiallitiques sans réserve calcique sous taillis de  
Chêne pubescent :

7043	x = 855,8 ;	y = 194,7 ;	alt. = 820 m
7044	x = 857,5 ;	y = 196,5 ;	alt. = 860 m
7047	x = 858,3 ;	y = 193,1 ;	alt. = 810 m
7055	x = 855,9 ;	y = 194,3 ;	alt. = 810 m
7057	x = 855,8 ;	y = 206,0 ;	alt. = 950 m
7068	x = 855,2 ;	y = 200,2 ;	alt. = 870 m
7248	x = 856,3 ;	y = 203,7 ;	alt. = 940 m
7348	x = 856,3 ;	y = 203,7 ;	alt. = 940 m

- GARRIGUES LANGUEDOCIENNES -

Carte I.G.N. au 1/50 000, feuilles de Sète, Montpellier,  
et St Martin de Londres.

- Sols fersiallitiques à réserve calcique sous bois ou tail-  
lis de Chêne-vert :

N° des profils	Coordonnées Lambert et altitude		
6201	x = 715,3 ;	y = 157,4 ;	alt. = 175 m
6204	x = 715,3 ;	y = 157,4 ;	alt. = 175 m
6222	x = 716,7 ;	y = 133,9 ;	alt. = 20 m
6223	x = 715,9 ;	y = 133,0 ;	alt. = 25 m
6230	x = 719,7 ;	y = 156,4 ;	alt. = 176 m
6231	x = 719,7 ;	y = 156,4 ;	alt. = 176 m
6233	x = 715,8 ;	y = 133,7 ;	alt. = 80 m
6237	x = 714,2 ;	y = 133,1 ;	alt. = 210 m
6238	x = 714,1 ;	y = 133,0 ;	alt. = 210 m
6251	x = 716,4 ;	y = 139,1 ;	alt. = 40 m
6260, 6301, 6302, 6303, 6305, 6307, 6309, 6310, 6311, 6312 :	x = 722,7 ;	y = 149,9 ;	alt. = 85 m

- Sols fersiallitiques à réserve calcique sous garrigues à  
Chêne Kermès :

6206	x = 719,1 ;	y = 156,6 ;	alt. = 160 m
6207	x = 719,1 ;	y = 156,1 ;	alt. = 150 m
6213	x = 715,2 ;	y = 136,7 ;	alt. = 60 m
6219	x = 716,4 ;	y = 135,0 ;	alt. = 30 m
6221	x = 719,1 ;	y = 156,5 ;	alt. = 150 m
6234	x = 713,5 ;	y = 132,2 ;	alt. = 210 m

- Sols fersiallitiques à réserve calcique sous pelouses à  
Brachypodium ramosum :

6211	x = 659,9 ;	y = 95,1 ;	alt. = 145 m
6214	x = 715,0 ;	y = 149,0 ;	alt. = 110 m
6216	x = 720,5 ;	y = 138,0 ;	alt. = 30 m
6220	x = 716,4 ;	y = 135,0 ;	alt. = 30 m
6225	x = 718,1 ;	y = 139,6 ;	alt. = 30 m
6228	x = 719,1 ;	y = 139,9 ;	alt. = 45 m
6229	x = 718,9 ;	y = 139,6 ;	alt. = 35 m
6235	x = 713,7 ;	y = 132,1 ;	alt. = 210 m
6236	x = 714,8 ;	y = 133,7 ;	alt. = 200 m
6258	x = 704,5 ;	y = 145,0 ;	alt. = 250 m
6260, 6261	x = 722,7 ;	y = 149,9 ;	alt. = 85 m
6289	x = 711,0 ;	y = 161,4 ;	alt. = 230 m

- Sols bruns calcaires, rendzines  
Sous taillis ou forêts de Chêne vert :

1927	x = 720,4 ;	y = 137,8 ;	alt. = 15 m
1928	x = 720,4 ;	y = 137,8 ;	alt. = 15 m

Sous pelouses à *Brachypodium ramosum* ou *phoenicoides* :

N° des profils	Coordonnées Lambert et altitude		
4285	x = 719,2 ;	y = 155,7 ;	alt. = 120 m
4286	x = 716,6 ;	y = 168,5 ;	alt. = 180 m
4287	x = 717,6 ;	y = 168,8 ;	alt. = 270 m
4288	x = 715,0 ;	y = 168,5 ;	alt. = 190 m
4299	x = 719,5 ;	y = 155,9 ;	alt. = 175 m

- Sols fersiallitiques sans réserve calcique sous bois ou taillis mixtes de Chêne vert et de Chêne pubescent avec *Erica arborea* et *Ruscus aculeatus*.

3267	x = 719,0 ;	y = 157,2 ;	alt. = 140 m
7243	x = 704,6 ;	y = 146,0 ;	alt. = 295 m
7244	x = 704,6 ;	y = 146,0 ;	alt. = 295 m
7250	x = 717,4 ;	y = 169,0 ;	alt. = 250 m
7253	x = 717,4 ;	y = 169,0 ;	alt. = 250 m
7266	x = 717,4 ;	y = 169,0 ;	alt. = 250 m
7269	x = 730,2 ;	y = 148,6 ;	alt. = 50 m
7270	x = 730,3 ;	y = 148,5 ;	alt. = 50 m
7271	x = 730,3 ;	y = 148,5 ;	alt. = 50 m
7273	x = 730,3 ;	y = 148,5 ;	alt. = 50 m
7280	x = 712,8 ;	y = 148,3 ;	alt. = 140 m
7281	x = 712,8 ;	y = 148,3 ;	alt. = 140 m
7284	x = 712,8 ;	y = 148,3 ;	alt. = 140 m