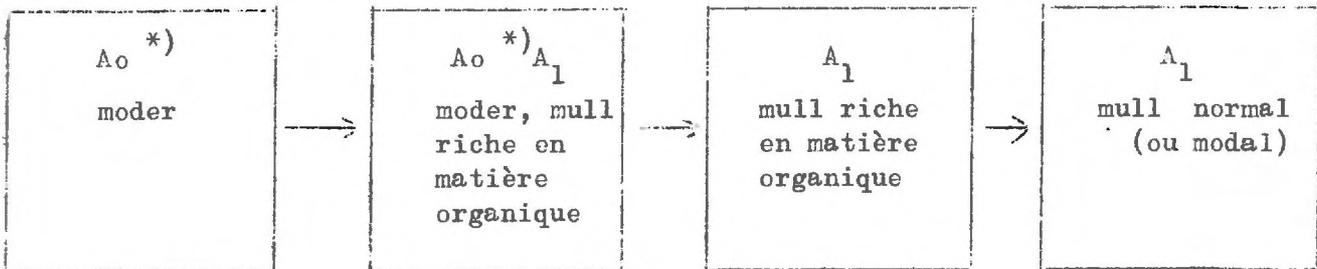


La succession d'horizons organiques suivante a pu être mise en évidence :



La présence de l'horizon A_0 , non accompagné d'un A_1 , c'est-à-dire le moder, qui repose sur la roche R, caractérise le sol litho-calci que étudié au chapitre I. Ce n'est pas un sol à mull ; mais on le retrouve, à certaines stations très particulières, dans l'étage montagnard ; aussi, l'avons-nous figuré, dans la série des profils organiques de cet étage. La succession, présentée ci-dessus, est une série évolutive c'est-à-dire, qu'elle est en relation avec les conditions bioclimatiques. En effet, les horizons organiques du type A_0 ou A_0A_1 , à mull riche en matière organique, sont fréquents, aux altitudes les plus élevées de l'étage montagnard : sous la pessière ou la hêtraie-sapinière ; les horizons organiques à mull normal sont plus fréquents sous la hêtraie mésophile. Il y a donc, pour les profils organiques, une certaine relation avec les conditions bioclimatiques. Cependant, ceci est un schéma général et, dans les détails, les faits sont plus complexes. En effet, on retrouve des horizons A_0 , sous la hêtraie mésophile et des sols sans humus brut, sous la pessière. Ceci est également explicable par la géomorphologie. Comme l'ont déjà montré DUCHAUFOR et BARTOLI (1966) et GILLOT (1967), la présence ou l'absence d'humus brut est liée à la présence ou à l'absence dans les horizons supérieurs du profil, d'argiles de décarbonatation en quantité suffisante. Sur les moraines, matériel jeune dont les argiles sont encore absentes ou peu importantes, se forment des humus bruts et ceci jusque dans les étages de la hêtraie mésophile. Inversement, si les argiles de décarbonatation sont en quantité suffisamment importante à la surface du profil, il ne se forme pas d'horizon A_0 , même sous la pessière. La présence des argiles permet la formation de mull. Il y a donc là encore, une influence des conditions géomorphologiques, sur la nature des horizons organiques. Les influences bioclimatiques interviennent dans l'épaisseur des horizons A_0 et les teneurs en matière organique dans les mulls. En altitude, les moders sont plus épais et les mulls plus noirs, que sous la hêtraie mésophile.

*) Revoir aussi note en bas de la page 30.

2.23 - EVOLUTION PROGRESSIVE, SPECIALISEE ET REGRESSIVE

Nous avons maintenant les éléments nécessaires, pour répondre à la question, posée au début de ce paragraphe : sur ce matériel géomorphologique tout à fait particulier, issu de calcaires durs, est-il possible de déceler une évolution morphologique des sols, à travers l'étage subalpin et montagnard ? Nous répondrons, en reprenant les notions rappelées précédemment, à l'évolution progressive, spécialisée et régressive.

L'évolution progressive consiste, d'une part, en un passage des profils A_1C à A_1 , d'abord calcaire puis calcique, vers les $A(B)C$ à (B) d'abord calcaire puis calcique. Elle consiste, d'autre part, en une évolution du profil organique du type A_0 vers A_1 à mull normal. Ceci a été schématisé dans la figure 10. Sur la verticale, en B, est représentée l'évolution morphologique du profil ; à l'horizontale en C correspond l'évolution du profil organique ; la droite oblique, en C, serait dans ce schéma une évolution progressive, qui aboutit au climax climatique : le sol $A(B)C$ à (B) calcique et à mull normal. Or une telle évolution est rarement observée, à travers les étages montagnards et subalpin. Aussi, cette droite est-elle discontinue. En effet, on observe parfois des passages d'horizons A_1 calcaires à calciques dans les profils A_1C , ou des évolutions de (B) calcaires à calciques. Mais on voit rarement le passage de profils AC vers des profils $A(B)C$.

Par contre, l'évolution des profils organiques, à travers les étages étudiés, est davantage vérifiée. S'il y a des sols sans humus brut sous la pessière, le mull reste très riche en matière organique. Ou bien, s'il y a des humus bruts, sous la hêtraie mésophile, par absence d'argiles en surface du sol, ceux-ci sont moins épais qu'en altitude.

Mais, dans le cas le plus général, il s'agit d'évolutions spécialisées. L'orientation particulière de la pédogénèse est imposée par les différents aspects géomorphologiques, sous lesquels se trouve la roche-mère calcaire dure. Cela se manifeste de deux manières. D'une part, les argiles de décarbonatation ne se trouvent pas à une profondeur suffisante, pour permettre la formation d'un horizon (B) . Le profil est du type AC , quelle que soit la série de végétation. C'est un cas très fréquent sur moraines, souvent observé sur les éboulis fixés, il est plus rare sur le matériel calcaire de remplissage karstique et exceptionnel sur le matériel décarbonaté suffisamment profond. L'autre manifestation d'une évolution spécialisée réside dans la présence, sous toutes les séries de végétation, d'horizons A_0 . On les trouve fréquemment sur les sols du type A_1C , mais aussi sur les sols du type $A_1(B)C$ à (B) calcique. Dans les deux cas, leur développement est dû à la présence d'un abondant squelette de cailloux calcaires, qui isole les argiles de décarbonatation de la surface du sol. Les argiles se trouvent entre les mailles du squelette, où ils forment l'horizon (B) ou un mull en A_1 . Le squelette dépasse l'horizon A_1 et isole la litière, du mull. Il se forme, à sa surface, un A_0 . Les climax stationnels, qui résultent d'une telle évolution, sont représentés dans la figure 10 en C, sous la colonne verticale, correspondant aux sols à humus brut.

Enfin, il reste l'évolution régressive. Sous la hêtraie mésophile, la prospection a été faite sous forêts, d'une part, et sous les pelouses issues de la dégradation des précédentes, d'autre part. L'évolution régressive est due essentiellement à des actions anthropiques. Elle modifie surtout le profil organique et, à un degré moindre, la morphologie. Les sols du type A(B)C ne sont pas modifiés ; mais leur profil organique s'appauvrit en surface. Les horizons A₀ sont très rares et très minces : 1 à 2 cm, sous les pelouses de dégradation ; les mulls riches en matière organique deviennent des mulls typiques. Dans les sols du type AC, la matière organique évolue de la même manière. Cependant, ici on assiste fréquemment au passage des horizons A₁ calciques vers des horizons A₁ calcaires ; c'est une réalimentation en carbonates, à partir de la roche-mère riche en cailloux fins. Ceci est fréquent sur moraines. L'évolution régressive est donc représentée, sur la figure 10 en C, par une droite horizontale. Elle est plus manifeste dans les sols du type AC que dans les sols du type A(B)C.

2.3 - NOMENCLATURE DES SOLS

De l'enseignement du paragraphe précédent, il convient de retenir, l'existence de sols du type AC ou A(B)C sous toutes les séries de végétation. Elle est due aux différents aspects géomorphologiques, sous lesquels se trouve la roche-mère calcaire. Les colonnes A et B de la figure 10 ont été reportées dans le tableau 3 également en A et B. Nous avons aussi vu plus haut, que dans chacun de ces types de sols, peuvent exister l'un quelconque des types d'humus de la colonne C de la figure 10. Ceux-ci sont également représentés en C (en haut et horizontalement) dans le tableau 3. On arrive ainsi, en tenant compte à la fois des types morphologiques et des types d'humus, à un certain nombre de combinaisons représentées en C dans le tableau 3. Leur évolution a été discutée précédemment et schématisée dans la figure 10. Le but de ce paragraphe est de regrouper les différentes combinaisons possibles et de proposer une nomenclature des sols.

Précisons tout de suite, que dans le tableau 3, sont également représentés les sols formés en absence de matériel de remplissage karstique, étudiés au chapitre I : les sols litho-calciques. D'une part, de tels sols existent encore dans l'étage montagnard, en particulier sur les moraines en pente et, d'autre part, ce tableau est ainsi complet et concerne tous les sols de montagne formés sur calcaires durs.

La nomenclature utilisée est celle proposée par les auteurs suisses, tels que BACH (1950), BACH et al. (1954), RICHARD (1961) puis par DUCHAUFOUR et BARTOLI (1966) et enfin par la C.P.C.S. (1967).

Sur le tableau, certains noms de sols sont encadrés. Ce sont ceux, qu'il conviendrait de retenir dans une systématique. Les autres sont, soit peu importants, ou des intergrades. Le cas de la rendzine, encadrée par un trait discontinu, sera discuté ci-après.

2.31 - LES SOLS BRUNS CALCIQUES

Les sols les plus évolués sont les sols bruns calciques du type A(B)C ou A(B)R, C étant les argiles de décarbonatation, qui se trouvent dans les fissures sous l'horizon (B). Ces sols sont décarbonatés, mais non décalcifiés. En général, ils sont localisés sur le matériel décarbonaté de remplissage karstique ou sur un matériel encore calcaire en profondeur et décarbonaté en A₁ et (B). Pour les étages étudiés ici, il convient de distinguer dans ce groupe, un sous-groupe modal et un sous-groupe de sols bruns calciques humifères. A ce dernier correspondent deux faciès : celui à humus brut et celui à mull riche en matière organique.

L'horizon A₀ est en général un moder, à structure fibreuse très aérée. Entre les mailles des fibres, on rencontre déjà des grumeaux de l'horizon A₁ sous-jacent et des déchets d'arthropodes. L'épaisseur du moder est de 2 à 20 cm, mais elle ne dépasse en général pas 2 à 7 cm.

L'horizon A₁ est de structure polyédrique subanguleuse à grumeleuse, de texture argileuse à argilo-limoneuse et de couleur foncée : 7,5 YR 3/0, 3/2 ; 10 YR 3/1, 3/2, 2/1, 2/2. Le passage vers l'horizon (B) est progressif. Celui-ci est de structure polyédrique subanguleuse à anguleuse ; la texture reste argileuse à argilo-limoneuse ; la couleur est ocre : 7,5 YR 5/4, 5/6 ou 10 YR 5/3, 5/4, 4/3, 4/4. Tous ces horizons minéraux restent squelettiques et les cailloux calcaires sont en général de grande taille : de 10 à 30 cm. Ils sont anguleux, plus ou moins émoussés.

Voici, à titre d'exemple, la description morphologique d'un sol brun calcique modal.

Profil V 58, Col des Limouches, lieu-dit Mangot, commune de La-Vacherie, carte IGN au 1/50 000, feuille de Charpey, x = 824,7 ; y = 292,8 ; altitude = 1100 m. Sur faible pente, exposition ouest, sous pelouse à *Festuca duriuscula* et à *Anthyllis vulneraria*.

- Hor. A₁ : 0 - 25 cm. structure polyédrique subanguleuse à grumeleuse fine à moyenne ; consistance dure à très dure à l'état sec ; texture limono-argileuse ; couleur 7,5 YR 3/2 à l'état humide ; 40 % de cailloux calcaires, sous forme de gros blocs corrodés ; absence de réaction à HCl ; pH Truog 6,7 ; présence de nombreuses racines de graminées ; passage progressif.
- Hor. A₁/(B) : 25 - 50 cm. Structure polyédrique subanguleuse fine ; consistance dure à très dure à l'état sec ; texture limono-argileuse ; couleur 7,5 YR 3/2 à l'état humide ; 60 % de cailloux calcaires sous forme de gros blocs corrodés ; présence de pellicules de dissolution ; réaction très faible à HCl et localisée à la proximité des cailloux. pH Truog 7,4 ; racines moins nombreuses ; passage progressif.

| GEOMORPHOLOGIE (TYPES DE ROCHES-MERES) | | TYPES DE MATIERE ORGANIQUE TYPES DE PROFILS | PRESENCE D'UN HUMUS BRUT | MULL RICHE EN MATIERE ORGANIQUE | MULL NORMAL | |
|---|----------------------|--|--|--|--|---|
| PRESENCE DE MATERIEL DE REMPLISSAGE KARSTIQUE | MATERIEL DECARBONATE | A ₁ (B) C ou A ₁ (B) R à (B) calcique | SOLS BRUNS CALCIFIQUES HUMIFERES | | SOLS BRUNS CALCIFIQUES MODAUX | |
| | | | Sol brun calcique à (B) calcique, à humus brut | Sol brun calcique à (B) calcique, humifère | | |
| | MATERIEL CALCAIRE | REPLISSAGE CALCAIRE | A ₁ (B) C ou A ₁ (B) R à (B) calcaire | Sol brun calcique à horizon (B) calcaire, à humus brut | Sol brun calcique à horizon (B) calcaire, humifère | Sol brun calcique à horizon (B) calcaire, modal |
| | | EBOULIS | A ₁ R ou A ₁ C à A ₁ calcique | SOLS HUMO-CALCIQUES | | RENDZINES BRUNIFIEES |
| | | | MORAINES | A ₁ R ou A ₁ C à A ₁ calcaire | SOLS HUMO-CALCAIRES | |
| ABSENCE DE MATERIEL DE REMPLISSAGE KARSTIQUE | | A ₀ A ₁ R (A ₁ peu développé) | SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES (chapitre I) | — | — | |
| | | A ₀ R | | | | |
| | | A ₀ /A ₁ R | | | | |
| A | | B | C | | | |

SOLS HUMIFIQUES CARBONATES

Tableau 3 – Types morphologiques de sols de montagne développés en présence et en absence de matériel de remplissage karstique.

Hor. (B) : 50 - 90 cm. Structure polyédrique subanguleuse moyenne ; consistance très dure à l'état sec ; texture limono-argileuse ; couleur 7,5 YR 4/4 à l'état humide ; 20 % de cailloux calcaires sous forme de gros blocs corrodés ; présence de pellicules de dissolution ; réaction à HCl très faible ; pH Truog 7,6 ; racines rares ; passage très net à R mais très irrégulier.

Hor. R : Roche calcaire compacte en place, très corrodée, elle remonte dans le profil jusqu'à 20 cm de la surface.

2.32 - LES SOLS HUMIQUES CARBONATES, RENDZINES ET RENDZINES BRUNIFIÉES

A l'autre extrémité de la série de sols, formés en présence de matériel de remplissage, se trouvent les sols du type AC, avec A calcaire ou calcique. Nous distinguons là, des sols humo-calcaires, humo-calcaires, des rendzines brunifiées et des rendzines.

Les sols humiques carbonatés n'ont pas d'horizon (B). Ils sont issus d'une évolution spécialisée ; Le facteur limitant du développement du sol est d'ordre géomorphologique. Ces sols sont sur un matériel très squelettique ; il s'agit en général de moraines et d'éboulis.

Ils sont du type A_1C ou A_0A_1C ou, plus généralement, A_1R ou A_0A_1R . A_0 est un moder^{*)} et A_1 un mull riche en matière organique. Suivant l'évolution de ces sols, ou le matériel sur lequel ils se trouvent, A_1 est calcaire ou calcique. Ceci a permis de distinguer, sur le plan de la pédogénèse, deux types de sols humiques carbonatés, d'une part, des sols humo-calcaires et d'autre part, des sols humo-calcaires. Ces sols ont été distingués par les auteurs cités plus haut, sous d'autres termes : sols humiques carbonatés, pour les humo-calcaires, sols humiques carbonatés évolués, pour les humo-calcaires. Les noms utilisés ici sont employés par simple souci de clarté dans les termes. A travers tous ces sols sur calcaire, en effet, les qualificatifs de calcaire et calcique sont très commodes et sans équivoque. Sur le plan morphologique, l'horizon A_0 est du type moder, l'horizon A_1 est de couleur foncée, comme dans les sols bruns calciques humifères. La structure est polyédrique subanguleuse à grumeleuse et la texture est argileuse à limoneuse. Ces sols restent toujours très squelettiques. Voici, à titre d'exemple, la description morphologique d'un sol humo-calcaire.

Profil V36, lieu-dit route des Rancs, commune de St Agnan-en Vercors, carte IGN au 1/50 000, feuille de La-Chapelle-en-Vercors, x = 846,1 ; y = 294,5 ; altitude 1450 m, exposition ouest ; sous pessière à myrtilles avec *Melampyrum pratense* et mousses, sur faible pente, sur calcaire compact du Crétacé inférieur.

*) Revoir note en bas de la page 30.

- Hor. A₀₀ : 0 - 2 cm Litière, aiguilles d'Epicea, ou mousse en décomposition.
- Hor. A₀ : 2 - 5 cm en moyenne, mais épaisseur variable jusqu'à 7 cm ; structure fibreuse très aérée, entre fibres déjà présence de quelques grumeaux de l'horizon A₁ ; localement présence de mycelium blanc ; couleur état humide 5 YR 2/1 ; 30 % de cailloux calcaires, arrondis par dissolution, d'un diamètre de 2 à 3 cm ; absence de réaction à HCl ; pH Truog : 5 ; passage progressif.
- Hor. A_{0/A₁} : 5 - 10 cm ; structure encore fibreuse, avec plus grande abondance entre les fibres de grumeaux du mull sous-jacent ; même couleur que A₀ ; 40 % de cailloux calcaires, d'un diamètre de 2 - 5 cm ; absence de réaction à HCl ; pH Truog : 6,5 passage progressif.
- Hor. A₁ : 10 - 30 cm en moyenne ; épaisseur très variable, suivant substratum ; mull très organique ; structure grumeleuse, à polyédrique subanguleuse, fine à très fine ; consistance dure à très dure à l'état sec ; texture argilo-limoneuse ; couleur à l'état humide 5 YR 3/1 ; 40 % de cailloux calcaires, de 5 à 20 cm de diamètre ou blocs en place ; absence de réaction à HCl ; pH Truog : 6,5 ; passage très net mais très irrégulier.
- Hor. R : 30- ... Roche-mère calcaire compacte, en place, fortement corrodée.

Les rendzines brunifiées, à horizon A₁ décarbonaté et les rendzines, à horizon A₁ calcaire, se distinguent des sols précédents par trois caractères : elles contiennent moins de matière organique, que les sols humiques carbonatés ; elles sont, de ce fait, moins foncées ; enfin, elles sont davantage structurées, par absence de matière organique libre, du type humus brut fibreux, accumulée entre les grumeaux de l'horizon A₁, comme c'est fréquemment le cas dans les sols humiques carbonatés. Les rendzines sont presque toujours issues de la dégradation anthropique d'anciens sols humiques carbonatés. C'est la raison pour laquelle, elles sont encadrées, dans le tableau 3, par un trait discontinu.

2.33 - LES INTERGRADES

Entre les sols bruns calciques et les sols humiques carbonatés, il y a une série de sols intermédiaires, que nous avons appelés : sols bruns calciques à horizon (B) calcaire. En fait, cet horizon (B) calcaire est souvent aussi un horizon (B)/C. Il s'agit là, d'intergrades et il ne semble pas nécessaire de les retenir dans la systématique.

2.34 - CONCLUSION

En définitive, notre but était de saisir l'évolution spécialisée ou stationnelle, au sens de DUCHAUFOR (1966). La pédogénèse est orientée par un facteur du milieu particulièrement prédominant. Ici, elle est arrêtée, ou plus ou moins freinée, par la nature particulière du matériel. En absence ou en présence d'une quantité faible d'argiles, le sol est peu évolué. La présence d'argiles de décarbonatation, sur une épaisseur suffisante, permet la formation des horizons (B). La répartition des types morphologiques de sol est indépendante des séries de végétation. Le profil organique en particulier la répartition des horizons A₀, sont également influencés par les conditions géomorphologiques. Cependant, c'est dans ce profil organique, que les influences bioclimatiques sont les plus manifestes : les horizons A₀ sont plus épais et plus riches en matière organique, en altitude, que sous des conditions moins froides et moins humides.

2.4 - PROPRIETES CHIMIQUES DE CES SOLS

Nous examinerons successivement la répartition du calcaire et des bases, celles des sesquioxydes et enfin les valeurs caractéristiques concernant la matière organique.

2.41 - LE CALCAIRE ET LES BASES

LES CARBONATES

Le paragraphe précédent nous montre que, mis à part les rendzines, issues de la dégradation anthropique et quelques sols humo-calcaires, liés à des situations géomorphologiques tout à fait particulières, telles que les moraines, les sols à A₁ calcaire sont rares sur calcaires durs en montagne. Nous avons vu aussi que, par contre, les horizons (B) calcaires sont plus fréquents. Le dépouillement des analyses concernant les carbonates mène aux conclusions suivantes :

- Les horizons A₁ et (B) calcaires ont des teneurs en CO₃Ca très variables : de 2 à 60 %.

- En profondeur, elles augmentent progressivement. Les chiffres les plus élevés sont obtenus à partir des moraines, qui renferment jusqu'à 90 % de CO₃Ca, dans la terre fine (figure 9). Dans le matériel calcaire de remplissage karstique, il y a moins de CO₃Ca. Enfin, les éboulis fixés sont peu ou non calcaires dans leur terre fine, malgré leur forte charge en cailloux.

- Partout, ce calcaire est essentiellement réparti dans les fractions granulométriques grossières. Les valeurs obtenues, concernant le calcaire actif dans les horizons A₁ et (B) calciques ou calcaires, sont généralement faibles : de 0 à 5 % en moyenne ; elles n'apportent pas beaucoup de renseignements.

- Rappelons, pour être complet, que le matériel décarbonaté de remplissage karstique ne contient jamais de nodules calcaires, très fréquents par contre dans les karsts méditerranéens.

- Citons aussi l'existence fréquente dans les éboulis fixés, d'horizons B_{Ca} , dont les dépôts calcaires se trouvent sous forme de pseudo-mycélium. Ils sont à des profondeurs variables et liés aux circulations souterraines des eaux. Ils sont toujours situés plus bas que les horizons (B).

LES BASES

Concernant la dynamique des bases à travers ces sols, trois valeurs sont examinées : S, T et pH.

Les résultats obtenus à partir de S et T sont représentés dans la figure 11. Dans la plupart des horizons examinés, la somme des bases obtenue lors de l'analyse était supérieure à celle de T. Il a déjà été dit précédemment, qu'il s'agissait là d'une dissolution de calcaire par l'acétate d'ammonium à pH 7. Les résultats montrent, que cette dissolution a lieu même dans des horizons qui contiennent peu de CO_3Ca , c'est-à-dire ceux où les valeurs du calcaire actif restent faibles.

Dans les sols examinés, le complexe absorbant reste désaturé ou égal à 100 % dans trois types d'horizons. Ils sont représentés dans la figure 11.

- Dans les horizons A_0 , sous hêtraie, le complexe est désaturé. Les valeurs sont très dispersées ; il n'existe pas de corrélation entre S et T. Dans la figure, les valeurs sont représentées par une surface délimitée par l'écart-type de T sur l'abscisse et de S sur l'ordonnée, de part et d'autre de la moyenne. Ces valeurs ne sont pas significativement différentes de celles des moders observés sous pessière et étudiés au chapitre précédent.

- Un autre cas, où le complexe absorbant reste désaturé est celui des horizons A_1 des sols bruns calciques également sous pessière. Dans ces horizons, il existe entre S et T une corrélation significative à 95 % ; elle est schématisée dans la figure 11 et se situe près de $S/T = 80 \%$.

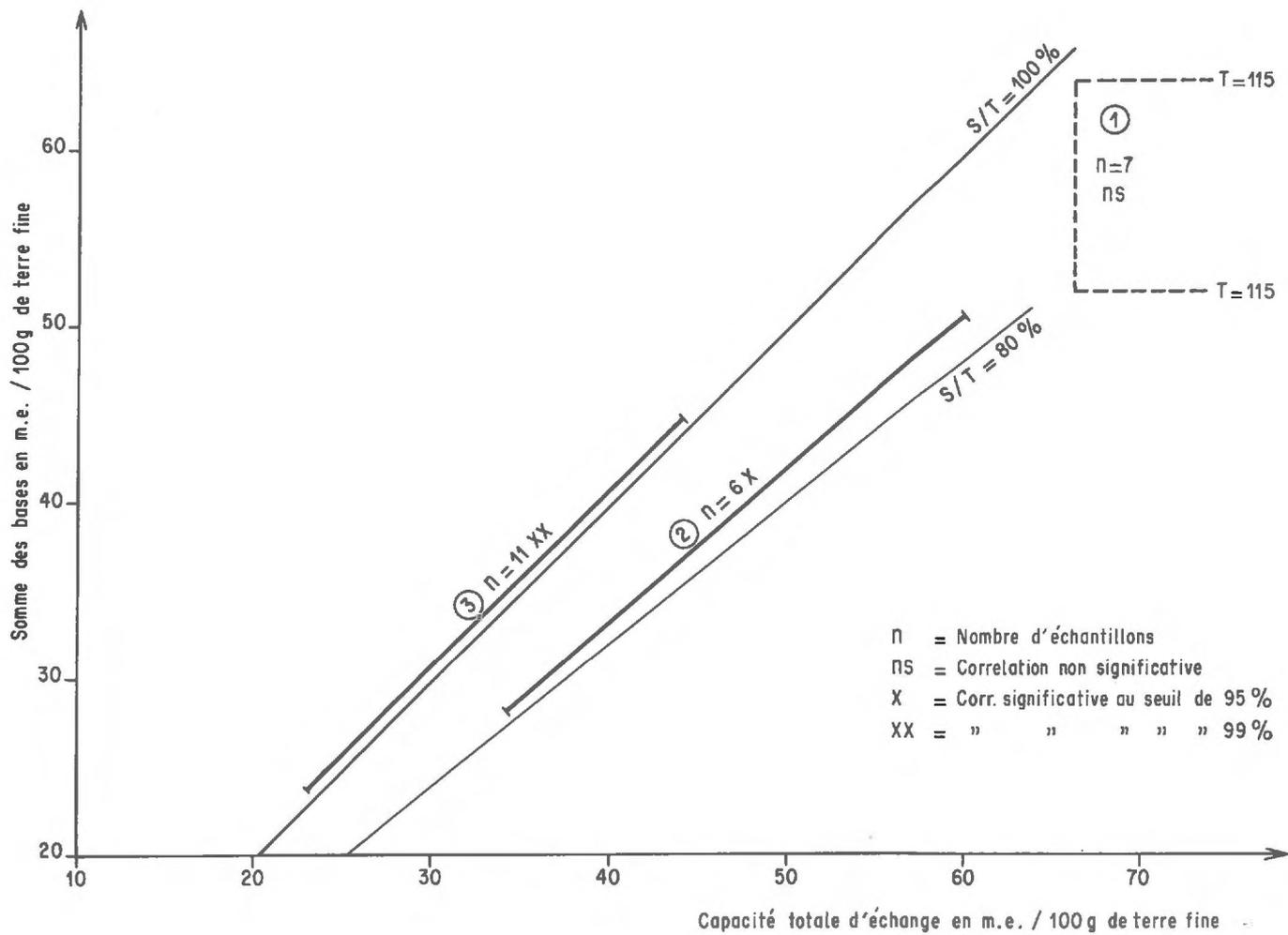
- Enfin le troisième cas est celui des horizons A_1 des sols bruns calciques sous hêtraie mésophile. La corrélation entre S et T existe également, elle est située à $S/T = 100 \%$.

On constate donc, dans ces horizons A_1 complètement décarbonatés, une influence des conditions bioclimatiques : la décalcification est plus avancée sous pessière que sous hêtraie mésophile.

Considérons ensuite les valeurs du pH. Elles sont données ci-après dans un certain nombre de types d'horizons.

- Les horizons A_0 des sols bruns calciques et des sols humo-calciques sous hêtraie :

pH (H_2O) moyenne : 6,2 ; écart-type : 0,4 n = 7
pH (KCl) moyenne : 5,9 ; écart-type : 0,3 n = 7



LEGENDE

- ① HORIZONS A₀ des SOLS BRUNS CALCIFIQUES et des SOLS HUMO-CALCIFIQUES sous HETRAIE
- ② HORIZONS A₁ des SOLS BRUNS CALCIFIQUES sous PESSIERE
- ③ HORIZONS A₁ des SOLS BRUNS CALCIFIQUES sous HETRAIE MESOPHILE

Figure 11 - Taux de saturation du complexe absorbant dans les horizons décarbonatés des sols de montagne développés en présence d'argiles de décarbonatation.

- Les horizons A₁ des sols bruns calciques, sous pessière :

pH (H₂O) moyenne : 6,2 ; écart-type : 0,9 n = 6

pH (KCl) moyenne : 5,6 ; écart-type : 0,4 n = 6

- Les horizons (B) non calcaires des sols bruns calciques sous pessière :

pH (H₂O) moyenne : 7,1 ; écart-type : 0,5 n = 3

pH (KCl) moyenne : 6,3 ; écart-type : 0,5 n = 3

- Les horizons A₁ des sols bruns calciques, sous hêtraie :

pH (H₂O) moyenne : 6,9 ; écart-type : 0,7 n = 9

pH (KCl) moyenne : 6,1 ; écart-type : 0,9 n = 9

- Les horizons (B) non calcaires des sols bruns calciques sous hêtraie :

pH (H₂O) moyenne : 7,2 ; écart-type : 0,2 n = 5

pH (KCl) moyenne : 6,6 ; écart-type : 0,2 n = 5

Ces résultats, concernant les valeurs de pH confirment ceux obtenus pour S et T.

- On constate d'abord que les horizons A₀ sont acides, de même que les horizons A₁ sous pessière. Ils sont, en effet, aussi désaturés.

- Les horizons A₁ sous hêtraie sont saturés, mais ils sont complètement décarbonatés ; leur pH (H₂O) est proche de la neutralité.

- Enfin, le pH (H₂O) des horizons (B) est légèrement au-dessus de la neutralité. C'est dans ces horizons, que les valeurs obtenues pour S étaient supérieures à celles de T, signe d'une décarbonatation incomplète.

En définitive, en ce qui concerne le calcaire et la dynamique des bases à travers les sols examinés dans ce chapitre, il convient de retenir les faits suivants :

- Dans les horizons A₀, le complexe absorbant est désaturé ; la décarbonatation dans ces milieux très organiques est probablement très active. Les précipitations sont abondantes, les eaux sont froides, et il se dégage dans l'horizon A₀ des acides organiques agressifs et du CO₂. Cependant, ces moders, formés à partir de la litière, recouvrent le sol minéral, le mélange avec le squelette calcaire est mal assuré et la dissolution des carbonates à partir des cailloux calcaires n'est pas capable de saturer le complexe absorbant.

- Dans les horizons A₁ des sols bruns calciques sous pessière, c'est-à-dire ceux dont le complexe absorbant est désaturé, la décarbonatation reste encore très active ; elle est achevée dans la terre fine et s'exerce à la surface du squelette. Les bases mises en solution sont énergiquement éliminées de l'horizon, puisque le complexe reste légèrement désaturé.

- Dans les horizons A₁ des sols bruns calciques sous hêtraie, le complexe est par contre déjà saturé. Les conditions de décarbonatation et de décalcification sont ici moins favorables.

- Dans les horizons (B), même faiblement calcaires ou décarbonatés, les valeurs du pH sont légèrement supérieures à 7 et le complexe est saturé. A ces niveaux, la décarbonatation est lente, et les solutions sont probablement moins agressives qu'en surface. La différence entre sols sous pessière et sols sous hêtraie n'apparaît plus ici.

- Enfin, dans les horizons A₁ des sols humo-calciques le complexe absorbant est également saturé et les valeurs de pH(H₂O) sont légèrement supérieures à 7. La proximité de la roche-mère calcaire et l'abondance du squelette s'opposent également ici à la désaturation, même sous la pessière.

2.42 - LIBERATION ET ENTRAINEMENT DES SESQUIOXYDES

Les indices d'entraînement de l'aluminium libre et total et du fer libre, les variations du fer total et les rapports Al libre/Al total et Fe libre/Fe total sont donnés dans la figure 12.

Les indices d'entraînement (cases A, E, C, D) correspondent aux sols bruns calciques, sous la hêtraie mésophile d'une part et aux sols bruns calciques, sous la pessière, d'autre part.

Les rapports Fe libre/Fe total, Al libre/Al total intéressent, en plus, les sols humiques carbonatés. Les cases E et F concernent donc les sols bruns calciques + sols humiques carbonatés sous la hêtraie et par ailleurs, ceux sous la pessière.

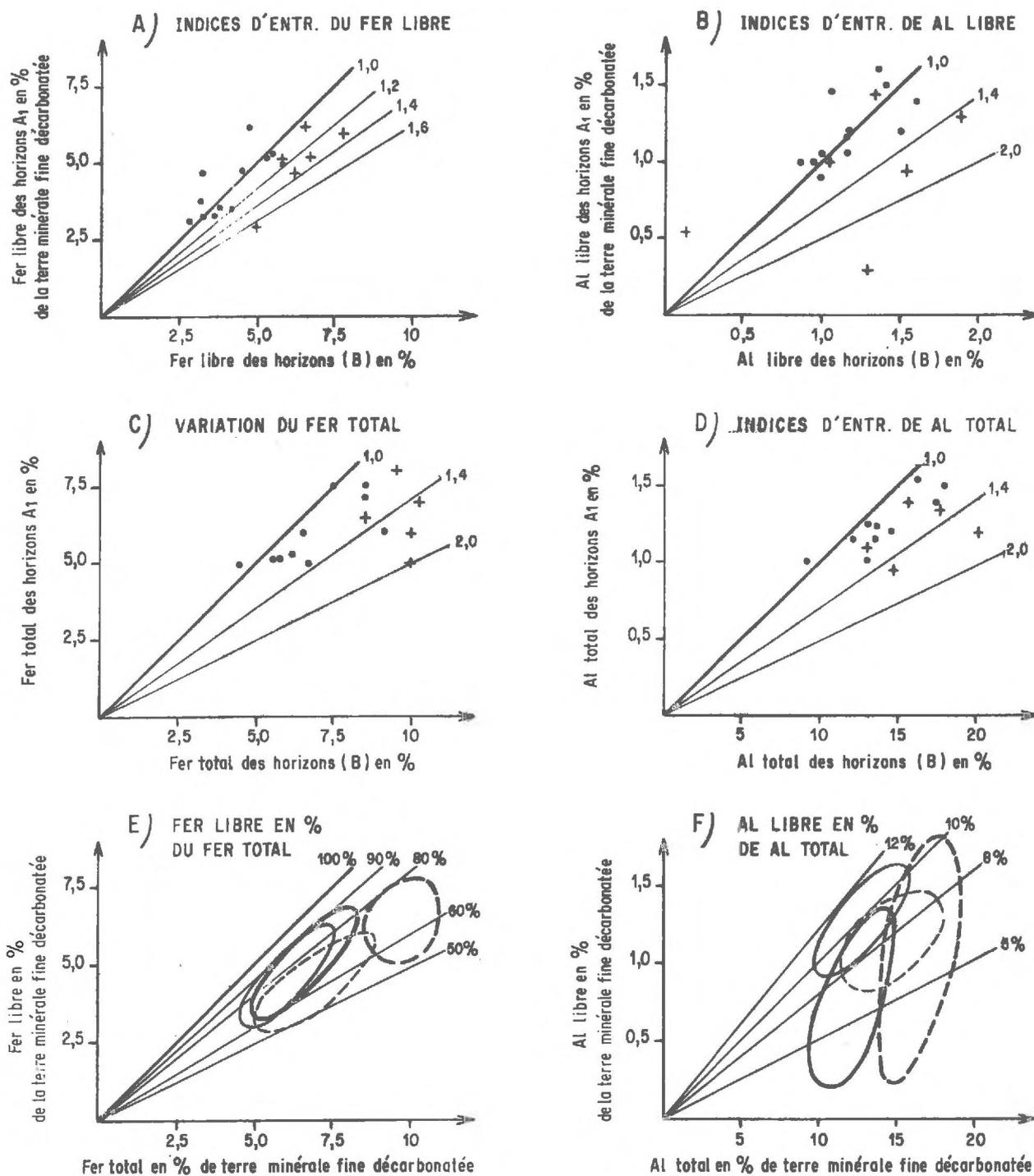
Rappelons, que les valeurs sont exprimées en % de la terre minérale fine décarbonatée, c'est-à-dire, déduction faite de la perte au feu et du calcaire. Le but recherché est, en effet, d'étudier les modifications, que subissent les argiles de décarbonatation et les composés du fer, à travers les sols.

Afin de ne pas multiplier les figures et afin de garder celles-ci lisibles, les rapports Fe libre/Fe total et Al libre/Al total ne sont pas représentés par des points, mais par des surfaces correspondant à des nuages de points. Celles-ci sont délimitées d'une manière empirique. Le nombre de points n'était en effet pas suffisant dans certains cas, pour permettre une représentation par des méthodes statistiques, qui auraient été plus intéressantes.

LE FER

Dans l'examen des résultats seront d'abord envisagés ceux concernant le fer. Trois points essentiels sont mis en évidence.

- Le premier intéresse les rapports Fe libre/Fe total (case E). Les données sont identiques dans les sols sous hêtraie et ceux sous pessière. Les rapports sont plus élevés dans les horizons A₁ (60 à 90 %), que dans les (B) (50 à 80 %). Cependant, le calcul montre, que cette différence n'est pas significative.



LEGENDE

- Sols bruns calcaïques sous hêtraie mésophile
n = 12
- + Sols bruns calcaïques sous pessière
n = 5

| HETRAIE MÉSOPHILE | SOLS BRUNS CALCAÏQUES SOLS HUMIQUES CARBONATÉS RENDZINES BRUNIFIÉES |
|--------------------|---|
| — n = 20 — | Horizons A ₁ |
| - - - n = 12 - - - | Horizons (B) calcaïres ou calcaïques |
| PESSIÈRE | |
| — n = 5 — | Horizons A ₁ |
| - - - n = 5 - - - | Horizons (B) calcaïres ou calcaïques |

Figure 12 - Libération et entraînement des sesquioxydes dans les sols bruns calcaïques et les sols humiques carbonatés.

- le deuxième point concerne la variation du fer total à travers le profil (case C). Elle est faible dans les sols bruns calciques sous la hêtraie mésophile. Sous pessière, par contre, elle est plus importante.

- Enfin, les indices, concernant le fer libre (case A), sont relativement faibles. Aux alentours de 1 sous la hêtraie, ils sont de 1 à 1,6 sous la pessière.

Le calcul montre, que les différences entre indices d'entraînement du fer libre et les variations du fer total, sous hêtraie d'une part et sous pessière d'autre part, sont significatives.

Dans l'interprétation des résultats, expliquons d'abord la forte proportion de fer libre dans tous ces sols, pourtant restés calciques. C'est un point commun, à tous les sols sur calcaires durs. A propos des sols litho-calciques, étudiés au chapitre I, l'hypothèse de formes mobiles ou facilement mobilisables du fer, dès la formation du matériel résiduel de décarbonatation a été proposée.

Dans les sols, sous pessière, plus désaturés, plus acides, plus favorables à la complexation du fer, celui-ci est partiellement entraîné. Les variations du fer total sont plus élevées que les indices d'entraînement du fer libre. Il s'agit probablement là, d'une immobilisation du fer dans les horizons (B), plus calciques ou calcaires.

Dans ces mêmes sols sous la hêtraie, les indices sont trop faibles pour être significatifs. A la différence des précédents, ces sols sont saturés dès la surface. Par contre les rapports Fe libre/Fe total restent ici élevés.

L'ALUMINIUM

Les données concernant l'aluminium sont également exprimées dans la figure 12, en B, D et F. En ce qui concerne les sols sous la hêtraie mésophile, les renseignements obtenus confirment ceux relatifs au fer. L'illuviation de l'aluminium libre ou total est faible à inexistante et les argiles de l'horizon A₁ s'avèrent plus altérées (10 % d'aluminium libre par rapport à l'aluminium total) que celles en (B) (8 %). Remarquons que les variations du rapport Al libre/Al total sont, pour l'ensemble des sols examinés dans ce travail, de 3 % à 16 %.

Dans ces sols, les argiles ne sont pas non plus ou faiblement entraînées. Les indices d'entraînement ne sont pas mentionnés dans la figure. La granulométrie n'a en effet souvent pas été réalisée, les horizons de surface étant fréquemment trop organiques.

En définitive, dans les sols bruns calciques de la hêtraie mésophile, l'entraînement des argiles, du fer et de l'aluminium libre reste limité. Les composés du fer et les argiles sont plus altérés dans les horizons A₁, que dans les horizons (B). Le test de STUDENT ne permet

pas d'établir une différence significative, dans les rapports Al libre/Al total ou Fe libre/Fe total, entre les horizons A₁ et (B), puisque les différences sont faibles et les valeurs absolues sont variables. Mais cela est vérifié dans la plupart des profils pris séparément.

En ce qui concerne les sols, étudiés sous la pessière, le problème est plus complexe, pour l'aluminium et les argiles. On note (figure 12 D) une illuviation en aluminium total dans tous les profils analysés ; les indices varient entre 1,2 et 1,8. Les mêmes valeurs sont observées pour les argiles. Elles ne sont pas représentées dans la figure. Ces sols sont donc en voie de lessivage et c'est là, la première différence avec les sols étudiés sous hêtraie. La deuxième réside dans la répartition de l'aluminium libre à travers le profil et dans les rapports Al libre/Al total. Les valeurs données dans la figure, en B et F, sont très hétérogènes. Il n'est plus possible ici de dégager une idée générale, concernant la libération de l'aluminium et son entraînement. Chaque profil est à considérer, comme un cas particulier. Il convient de retenir les deux types suivants :

- Des sols, dont le rapport Al libre/Al total reste plus élevé en A₁ (10 %), qu'en (B) (8 %), ou ne varie pas à travers le profil. Il s'agit là, de sols semblables à ceux décrits sous la hêtraie. Le cas, étudié ici, correspond à un sol brun calcique, à horizon (B) calcaire, proche des sols humiques carbonatés.

- Des sols, dont le rapport Al libre/Al total est plus élevé en (B), qu'en A₁. Il s'agit en fait là, d'horizons B et plus spécialement de B_{Al} et B_{Fe}. Il semble, que ce cas soit fréquent, sous la pessière. Mais le nombre de profils étudiés (n=5) est insuffisant pour le confirmer. Dans ce deuxième cas, les sols sont donc en voie de podzolisation chimique, au sens de DUCHAUFOUR (1970). Ce processus sur roches-mères calcaires sera encore discuté dans le dernier chapitre de ce travail, à propos des sols sur calcaires tendres.

En définitive, ce paragraphe concernant les sesquioxydes a permis de mettre en évidence un certain nombre de faits résumés ci-dessous :

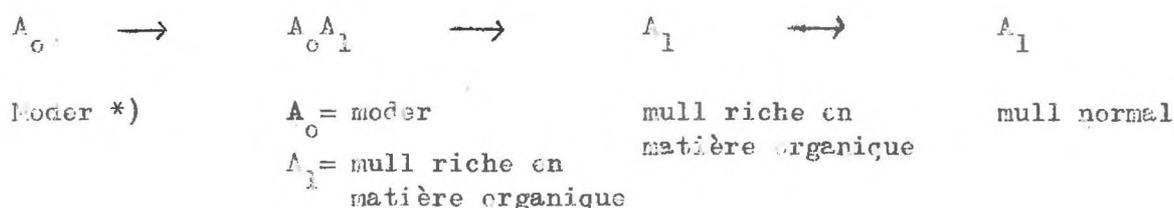
- Les sols bruns calciques, sous la hêtraie mésophile, ne sont pas ou faiblement lessivés ; les argiles et les composés du fer des horizons A₁ sont plus altérés qu'en (B). L'aluminium libre n'est pas entraîné.

- Les sols humiques carbonatés, les rendzines brunifiées, toujours sous la hêtraie, ont les mêmes caractères que les horizons A₁ des sols bruns calciques.

- Sous la pessière, les conditions bioclimatiques sont plus humides, plus froides et la végétation est plus acidifiante ; les caractères des sols sont plus hétérogènes. Certains sols bruns calciques sont semblables, à ceux de la hêtraie mésophile ; d'autres semblent être en voie de lessivage et en voie de podzolisation.

2.43 - LA MATIERE ORGANIQUE

L'évolution du profil organique, à travers les sols de montagne, développés sur matériel de remplissage karstique, a déjà été discutée, sur le plan morphologique, au début de ce chapitre. Les idées essentielles qui se dégagent sont les suivantes : le type de matière organique et sa répartition à travers les profils sont influencés par deux facteurs essentiels. D'une part, ils sont en relation avec les conditions bioclimatiques (climat, végétation) ; le schéma suivant, à travers l'étage subalpin et montagnard, a été proposé :



Par ailleurs, le profil organique est conditionné par la géomorphologie : en particulier, l'existence d'argiles de décarbonatation directement en contact avec la litière, amène la formation d'un mull, sans A_0 et ceci même sous la pessière ; si, par contre, la litière est séparée des argiles, par un squelette de cailloux, il se forme toujours un A_0 . Les conditions bioclimatiques interviennent alors dans l'épaisseur des horizons A_0 . Ce sont ces caractères, dégagés de l'examen morphologique des profils que nous nous proposons de compléter ici, à partir des résultats d'analyse concernant la matière organique.

Ceux-ci sont regroupés dans la figure 13. Elle représente, exprimées en fonction de la profondeur, les quatre valeurs les plus caractéristiques de la matière organique. Ce sont : le carbone organique total, exprimé en % de la terre fine, le rapport Carbone/Azote, le carbone des acides humiques en % du C. des ac. humiques + C. des ac. fulviques, et enfin le taux d'extraction correspondant au carbone des ac. humiques + C. des ac. fulviques en % du carbone organique total.

Les types de sols examinés sont représentés dans la légende de la figure 13. Elle est sous forme de tableau, dont les entrées verticales sont les mêmes que celles utilisées dans les autres figures de ce chapitre. Les types de sols sont partagés en trois groupes.

- Le groupe I correspond aux sols à mull, examinés sous la série mésophile du Hêtre. La matière organique a été étudiée, d'une part, sous forêts et d'autre part sous pelouses.

- Le groupe II représente les sols à modér, également sous hêtraie. Ces profils se trouvent uniquement sous forêts.

*) Renvoir note en bas de la page 30.

- Le groupe III correspond aux sols à mull, sous la pessière. C'est l'équivalent du groupe I. Ici aussi, seuls les profils sous forêts, ont été examinés.

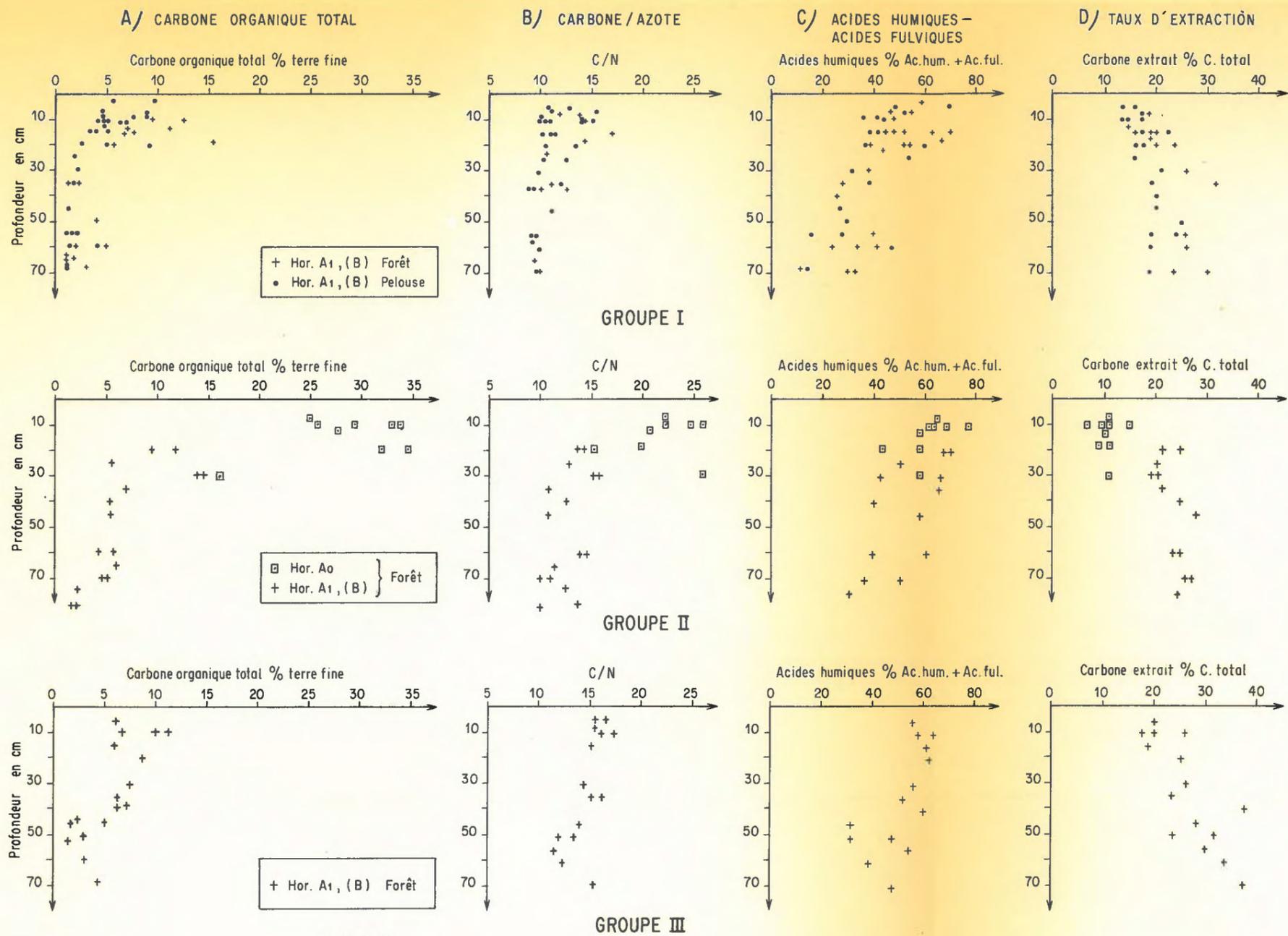
Il manque dans cette figure le groupe, correspondant aux sols à humus brut, sous pessière : l'équivalent du groupe II de la hêtraie. En fait, les profils organiques de ces sols à moder, sous la pessière, sont très semblables à ceux des sols litho-calciques à moder, étudiés au chapitre précédent. Il conviendra, à ce sujet, de comparer les résultats obtenus ici, à ceux de la figure 2 page 48. Enfin précisons, que dans chacun de ces groupes sont présentés à la fois les profils du type AC et A(3)C.

L'examen de cette figure amène un certain nombre de remarques.

La première concerne la distinction des profils organiques du groupe I (c'est-à-dire dans les sols à mull sans horizon A₀), sous forêt, d'une part, et sous pelouse de dégradation, d'autre part. Pour le carbone organique total la différence est nette : la dégradation de la végétation entraîne un appauvrissement des horizons de surface en carbone organique. Les profils organiques profonds, par contre, restent inchangés. Le C/N et la proportion des acides humiques ne permettent pas de différencier les profils, sous les deux types de formations végétales. Le taux d'extraction dans les horizons profonds semble par contre plus élevé, pour les sols forestiers, que pour les sols sous pelouses. Ce problème de la modification du profil organique, à la suite de la dégradation de la végétation, sera repris ultérieurement, au chapitre IV, à propos des sols du midi de la France. Il convient de se rappeler ou de retenir ici les faits suivants : l'examen morphologique a montré, que la dégradation des sols forestiers se faisait dans le sens horizontal de la figure 10 page 56 et du tableau 3 page 63. C'est-à-dire, que les sols bruns calciques, à humus brut ou à mull riche en matière organique, deviennent des sols bruns calciques à mull modal et que les sols humiques carbonatés se transforment en rendzines brunifiées ou en rendzines, dans le cas d'une remontée des carbonates par l'action de l'homme. L'examen des résultats, donnés ci-dessus, montre que seuls les horizons de surface sont appauvris en matière organique et que les autres valeurs caractéristiques de la matière organique ne semblent pas changer d'une manière significative.

Passons ensuite en revue les rapports acides humiques en % de AC. humiques + AC fulviques. On constate, dans tous les sols examinés, une augmentation de la proportion des acides fulviques du haut en bas du profil. Leur pourcentage augmente ; celui des acides humiques diminue. Cette même observation a déjà été faite, à propos des sols examinés dans le chapitre précédent. L'hypothèse d'une illuviation d'acides, à poids moléculaire faible, a alors été proposée.

Une autre remarque concerne les horizons A₀ du groupe II. Ils sont sous la hêtraie. Comme sous la pessière (figure 2 page 48), ce sont des moders. Ils sont très organiques, à C/N élevé : entre 15 et 25 et sont appauvris en acides fulviques, probablement par lessivage. Leurs taux d'extraction sont



LEGENDE

| TYPES DE MAT. ORG. | PRESENCE D'UN HUMUS BRUT | MULL RICHE EN. MAT. ORG. | MULL NORMAL |
|--------------------------|--|---|-------------|
| SERIE MESOPHILE DU HETRE | GROUPE II n = 8 profils + sous forêt uniquement | GROUPE I n = 25 profils + sous forêt, • sous pelouse | |
| SERIE DE LA PESSIERE | Voir chapitre I Figure 8 | GROUPE III n = 5 profils + sous forêt uniquement | |

Figure 13 - Valeurs caractéristiques concernant la matière organique des sols de montagne développés en présence d'argiles de décarbonatation.

très faibles, la fraction non extraite est constituée de matière organique non décomposée. La répartition des valeurs caractéristiques de ces horizons holorganiques est la même, que pour les moders sous la pessière. A travers les séries de végétation étudiées, les caractères chimiques des humus bruts ne varient pas.

Il s'agit maintenant d'examiner la variation à travers les mulls. A leur sujet certaines conclusions ont également été dégagées de l'examen morphologique des profils. Deux types morphologiques de mulls ont été distingués : des mulls modaux ou normaux et les mulls riches en matière organique, très noirs. Les premiers se forment dans les sols peu caillouteux, lorsqu'il y a suffisamment de terre fine dans le profil. Les seconds, par contre, caractérisent les sols squelettiques, pauvres en éléments fins, où toute la matière organique est concentrée au niveau de quelques fissures. Le stade encore plus avancé correspond aux profils à humus brut. Les mulls, sous l'horizon A₀, restent alors toujours riches en matière organique.

Comparons d'abord, sous la hêtraie, le mull modal et le mull riche en matière organique. Les deux sont regroupés en I, dans la figure 13. En effet, le dépouillement des résultats a montré, qu'à part les teneurs en matière organique totale, ces deux types de mulls ne se distinguent pas, par les autres valeurs caractéristiques, d'une manière significative.

Comparons ensuite le groupe I et le groupe III. Il s'agit dans les deux cas de mulls sans horizons A₀, mais le groupe I est sous la hêtraie, le groupe III sous pessière. Il y a là, un certain nombre de caractères distinctifs. La répartition du carbone organique total, à travers le profil, est dans les deux cas, à peu près identique. Ces deux types de mulls se distinguent, par l'évolution du C/N en fonction de la profondeur et par celle du taux d'extraction. Dans le groupe III, c'est-à-dire sous pessière, le C/N reste relativement élevé dans les horizons profonds et le taux d'extraction est également plus élevé, que sous la hêtraie. L'interprétation en est la suivante : les composés humiques, entraînés à travers le profil, sont moins facilement et moins rapidement biodégradés sous la pessière, que sous la hêtraie ; les C/N sous la pessière sont plus élevés et les composés restent sous des formes plus facilement extractibles au pyrophosphate de sodium.

En ce qui concerne les mulls du groupe II, c'est à dire ceux qui se trouvent sous les moders de la hêtraie, la figure 13 montre, qu'ils sont intermédiaires entre I et III, en particulier en ce qui concerne les rapports C/N et l'interprétation est identique. Les composés humiques provenant de l'horizon A₀ sont difficilement biodégradés.

Ces résultats ont permis de mettre en évidence, dans les profils organiques, des différences entre les sols sous la pessière et ceux sous la hêtraie mésophile. Les conclusions et les interprétations qui ont été formulées, seront reprises dans le chapitre V, consacré à une étude plus approfondie de la matière organique de l'ensemble des sols examinés sur calcaires compacts.

2.5 - SYNTHESE CONCERNANT LES SOLS DE MONTAGNE FORMES EN PRESENCE OU EN ABSENCE D'ARGILES DE DECARBONATATION DANS LE VERCORS

Cette synthèse concerne tous les sols inventoriés dans le Vercors. Ce sont ceux qui ont été analysés aux chapitres I et II. Ils sont en effet liés, parce que faisant partie d'une même mésoséquence ; dans ce travail ils ont été séparés, par simple souci de clarté.

Le but recherché dans le Vercors était de mettre en évidence une séquence de sols en relation avec les conditions bioclimatiques. Celle-ci a été examinée, sur le terrain, à travers tous les étages de végétation. Mais l'essentiel de la recherche a été concentré, au niveau d'un certain nombre de séries de végétation.

Deux groupes de facteurs importants, influant sur la pédogénèse ont été mis en évidence.

Le premier concerne les conditions bioclimatiques et la végétation : les facteurs micro et macro-climatiques et la nature des espèces végétales.

La géomorphologie constitue le deuxième facteur, en particulier, l'état d'évolution karstique et la nature, ainsi que la répartition, du matériel de remplissage. C'est à ce titre, que le Vercors constitue un terrain d'étude très intéressant et probablement le plus attrayant des massifs calcaires français.

En effet, à la séquence bioclimatique, à la succession des étages de végétation, se superpose également une "séquence karstique". Le Haut Plateau du Vercors est un karst jeune très peu évolué ni en surface ni en profondeur. Nous l'avons rapproché des karsts à djâle sporadique. Il correspond aux étages alpins et subalpins. De la partie inférieure de la pessière, à la hêtraie mésophile, les formes karstiques sont de plus en plus évoluées. L'évolution se manifeste par une multiplication, un élargissement et un approfondissement des fissures et par l'accumulation de matériaux de remplissage. Cette évolution est d'ailleurs mal expliquée dans le Vercors. En effet, ce massif constituait déjà une surface au Tertiaire. Il est probable, que les glaciers würmiens ont roboté les surfaces. On retrouve d'ailleurs autour du Vercors du matériel ancien ruéfié tel que celui de la vallée de Léoncel, à l'ouest du Vercors.

L'origine du matériel de remplissage karstique est également discutée, en particulier celui du matériel décarbonaté. Nous l'avons appelé argiles de décarbonatation, puisque cette origine est probable. Mais ce travail n'a pas pu apporter plus de précision, à ce sujet. Quelle que soit l'explication, on constate une séquence karstique dans le Vercors. Elle se superpose à la séquence bioclimatique. C'est là que réside toute la complexité de l'étude des sols du Vercors. En effet, d'un côté, on a sur le Haut Plateau, des conditions bioclimatiques très favorables à la pédogénèse. Les précipitations sont abondantes ; une partie importante donne origine à des eaux froides, issues de la fonte des neiges, chargées en CO_2 et propices à la décarbonatation. Sous la pinède à crochets et la pessière, s'ajoute

l'action d'une végétation acide et de l'humus brut, générateurs de composés organiques agressifs. Or ces surfaces sont très peu évoluées, dépourvues d'argiles de décarbonatation et les sols sont squelettiques : du type sols litho-calciques. Ces surfaces sont en effet très jeunes. Elles ont été rabotées par des glaciers récents. Ceux-ci les ont abandonnées tardivement. La pédogénèse, actuellement très active, s'est exercée pendant des périodes trop courtes. Sur ces calcaires compacts, les sols sont restés peu évolués.

Dans le Vercors occidental par contre, sous la hêtraie mésophile, les conditions sont moins favorables ; la végétation reste acide, mais les précipitations sont moins abondantes et l'enneigement moins important. Cependant les surfaces sont ici plus anciennes. Le karst a conservé des empreintes des périodes antérieures ; il est plus mûr et encombré de matériel de remplissage karstique. Les sols sont également plus évolués ; ce sont des sols à mull : du type AC ou A(B)C, suivant la nature carbonatée ou décarbonatée du matériel de remplissage ou suivant sa répartition dans les fissures ou à la surface de la roche.

L'évolution du karst, à travers le Vercors, est plus ou moins continue. Une coupure apparaît cependant et elle se situe dans la pessière. Dans la figure 1 page 32, elle correspond à peu près, à la coupure de pente entre les colonnes A et B. Ceci nous a amené, à distinguer dans la pessière deux zones. La première a été étudiée au chapitre I ; elle fait suite à la pinède à crochets ; la surface karstique est dépourvue, ou presque, d'argiles ; sur le terrain, elle correspond aux croupes et aux sommets. C'est là, qu'ont été étudiés les sols litho-calciques humifères à modér. La deuxième zone est constituée par les bas-fonds et les thalwegs. Les sols formés sont des sols à mull : du type AC ou A(B)C, étudiés au chapitre II. Ils sont développés sur des argiles probablement déjà anciennes et accumulées dans les points les plus bas.

Toutes les données sont rassemblées pour conclure, que la répartition des sols, à travers le Vercors, est en premier lieu imposée par la séquence karstique. Leur évolution est "stationnelle" et le facteur prédominant est d'ordre géomorphologique.

Il en est probablement ainsi, des autres massifs préalpins français, soumis aux glaciers würmiens : la Grande Chartreuse, les Bauges et, probablement aussi, le Haut Jura ; mais l'exemple du Vercors est, à ce titre, très instructif, parce que la séquence karstique y est très évidente.

Sur ce matériel hétérogène, dans cette mosaïque, l'idée directrice de ce travail, était de saisir des relations entre le sol et les conditions bioclimatiques. Le seul moyen à notre disposition était de comparer les sols, sur des matériaux géomorphologiques semblables. C'est dans cet esprit, qu'ont été élaborés les figures et les tableaux présentés dans les précédents chapitres.

Trois ensembles géomorphologiques se sont dégagés :

- Le premier est constitué, par les surfaces dépourvues d'argiles de décarbonatation. Elles sont seules présentes, sous l'étage alpin et subalpin, où elles sont constituées par les lapiaz, les champs de cailloux, les éboulis et les moraines. Elles disparaissent progressivement de la base de l'étage subalpin, à travers le montagnard, enterrées sous le matériel de remplissage karstique. Dans la série de la hêtraie mésophile, seuls quelques moraines et quelques lapiaz dépourvus d'argiles subsistent. Les sols sont du type A_0R ou A_0/A_1R et, dans les conditions les plus favorables, A_0A_1R . Nous les appelons sols litho-calcaïques humifères et proposons de les définir, comme étant formés sur calcaires compacts en montagne, en absence ou en présence d'une faible quantité d'argiles de décarbonatation. Dans la classification des sols de la CPCS (1967), ils sont dans la classe II : celle des sols peu évolués. Ces sols sont subdivisés, par la nature de leur matière organique. Le type d'humus est déterminé par les conditions bioclimatiques et la nature de la végétation. Sous la végétation basiphile ou neutrophile des pelouses, se forme un mull-moder, saturé à sursaturé, très bien polymérisé. Son recouvrement est incomplet et il passe au xeromor, dans les stations les plus sèches. Sous la pinède à crochets et sous la pessière, le recouvrement est complet ; l'humus brut est épais : du type mor, dans le Vercors du nord et en Chartreuse et du type moder, dans le Vercors du sud. Il est désaturé. A travers l'étage montagnard, c'est encore un moder, mais son épaisseur diminue. Aux basses altitudes, il disparaît : la roche-mère affleure à nu ; ceci sera le cas général sous les conditions méditerranéennes.

- Le deuxième ensemble de matériels comparables est celui qui donne origine aux sols du type A_1C ou A_1R . Ces sols restent très squelettiques ou très superficiels ; il ne se forme pas d'horizons (B) ou, si celui-ci existe, il est encore calcaire. Mais ce sont des sols à mull, formés sur argiles de décarbonatation. Ce type géomorphologique est souvent constitué de matériel de remplissage karstique, en voie de décarbonatation ou d'éboulis fixés. Sa présence est fréquente à travers tout l'étage montagnard ; on le trouve rarement dans les étages alpins ou subalpins du Haut Plateau du Vercors. C'est la roche-mère d'un ensemble des sols appelés : sols humiques carbonatés et rendzines brunifiées. En plus de l'absence de l'horizon (B), ces sols ont en commun deux caractères : d'une part ils sont généralement décarbonatés en A_1 et par ailleurs, leur complexe absorbant est saturé. C'est la matière organique, qui permet d'établir une systématique, dans ces profils du type AC. Trois cas sont possibles : la présence du mull modal et c'est la rendzine brunifiée, la présence d'un mull riche en matière organique, et enfin, la présence du même type de mull surmonté d'humus brut. Dans ces deux derniers cas, il s'agit de sols humiques carbonatés.

Dans les sols humiques carbonatés, ce travail a permis de distinguer des sols humo-calcaïques, qui sont décarbonatés en A_1 et des sols humo-calcaires, qui sont encore calcaires en A_1 . Les premiers sont plus fréquents que les seconds. Ils correspondent aux sols humiques carbonatés évolués des auteurs suisses, les seconds aux sols humiques carbonatés modaux. Ces mêmes auteurs distinguent aussi des s.h.c. acidifiés. Mais il s'agit là, de sols sur calcaires tendres. Ils seront traités dans un chapitre ultérieur. Afin de garder

un langage homogène, déjà utilisé par la CPCS (1967), nous avons préféré les termes calciques et calcaires, à ceux proposés par les auteurs suisses et utilisés jusqu'à présent. Enfin rappelons, pour être complet, que sur le plan de la morphologie, les sols humiques carbonatés se distinguent des rendzines brunifiées, d'une part, par la couleur de l'horizon A_1 plus foncée dans les premiers que dans les seconds et, à un degré moindre, par la structure.

La répartition de ces sols dans le Vercors pose un problème délicat, que nous avons essayé de résoudre. Elle est sous deux influences : l'une géomorphologique, l'autre bioclimatique. La première est évidente : la présence d'humus brut, d'un mull riche en matière organique ou d'un mull normal est dictée, par l'absence ou la présence en quantité faible, ou plus importante, d'argiles, en contact avec la litière. L'influence bioclimatique est, par contre, plus difficile à mettre en évidence. On constate, que les mulls les plus organiques sont dans les étages supérieurs. Les rendzines brunifiées sont plus fréquentes, sous la hêtraie mésophile.

- Le troisième ensemble de matériels comparables est constitué par le matériel de remplissage karstique, décarbonaté sur une profondeur suffisamment grande, pour permettre le développement d'horizons (B) non calcaires. Il s'agit, soit d'argiles de décarbonatation probablement antéwürm, soit de matériel périglaciaire plus récent, dont les niveaux supérieurs sont décarbonatés. Les sols formés sont des sols bruns calciques. Suivant l'importance de la matière organique, nous avons distingué dans la figure 3, des sols bruns calciques modaux et humifères ; ces derniers sont soit à mull riche en matière organique soit à A_0 . Dans le cas général, ces sols représentent, en montagne, sur calcaires compacts, le stade le plus avancé de la pédogénèse.

En fait, comme il sera montré dans le dernier chapitre de ce travail, sur calcaires compacts, des conditions géomorphologiques particulières permettent la formation de "sols lessivés podzoliques. Mais, il s'agit là de cas exceptionnels. Ces sols, plus évolués, se forment essentiellement en montagne sur calcaires tendres.

Dans ces sols bruns calciques, la réserve calcaire est moins importante. En effet, les surfaces de dissolution du CO_2Ca sont plus réduites. Les cailloux sont moins nombreux et de plus grande taille. C'est pour cette raison, que dans ces sols, l'action des conditions bioclimatiques et de la végétation a été mise en évidence plus facilement. Elle a été décelée dans tous les paramètres examinés : dans les valeurs de S/T et du pH, la libération et la migration des sesquioxydes et dans la nature de la matière organique.

Les sols les plus évolués sont sous la pessière. Leur présence est due à la combinaison de deux facteurs ; les conditions bioclimatiques et la nature acide de la litière des conifères. C'est sous la pessière, que le complexe absorbant des horizons A_1 est partiellement désaturé. Les horizons A_1

des sols bruns calciques, sous la hêtraie, restent saturés à 100 %. Concernant l'aluminium, nous avons montré, que dans les horizons A₁, il était partiellement libéré et que, dans certains profils sous la pessière, l'aluminium libre était entraîné. Ces sols sont en voie de lessivage et de podzolisation. Concernant le fer, l'hypothèse de la présence de composés du fer facilement mobilisables, dès la dissolution des carbonates, a été proposée. Ils sont également en voie de lessivage, sous la pessière, avec une immobilisation dans les horizons profonds plus calciques. Il convient donc d'appeler, sous pessière, certains de ces horizons : B et non (B). Cependant, les indices d'illuviation restent relativement faibles. Le comportement des composés humiques du mull, sous la pessière, est également particulier. On assiste à une illuviation de composés, dont le C/N reste élevé à des profondeurs plus grandes, que sous la hêtraie. Ils sont moins rapidement biodégradés et restent extractibles au pyrophosphate.

En définitive, c'est sous la pessière que se trouvent les sols les plus évolués. À des altitudes plus élevées, les conditions climatiques sont très propices à la décarbonatation, à la décalcification et à l'altération ; mais les conditions géomorphologiques et lithologiques entravent l'évolution des sols. À des altitudes plus basses, le matériel karstique est plus évolué ; mais le climat méditerranéen plus sec apparaît déjà.

CHAPITRE III

- 84 -

3 - UNE SEQUENCE DE SOLS DE MONTAGNE SOUMIS A DES INFLUENCES MEDITERRANEENNES : LE CAS DU MONT VENTOUX

Au sud du Vercors, au delà du Diois et des Baronnies, qui correspondent à la Fosse vocontienne, se trouve la ligne de crêtes, constituée par le Mont Ventoux et la Montagne de Lure. Ce sont deux bastions des Préalpes, avancés dans le monde méditerranéen. C'est dans ces deux chaînes de montagne, qu'a également été entreprise une prospection détaillée des sols. Le travail a surtout été concentré sur le sommet du Mont Ventoux, dont il est question dans ce chapitre. Cette montagne, qui culmine à 1908 m, est occupée par des séries de végétation, qui sont comparables à celles du Vercors. Une carte phytosociologique récente (la feuille de Vaison-la-Romaine), comportant le Mont Ventoux vient d'être publiée par GOBERT et FAUTOU (1969). Précisons aussi, que la végétation de la montagne de Lure a fait l'objet d'études de la part de MATHON (1952). L'objet de ce chapitre est de faire une comparaison. Il s'agit de comparer les sols de la séquence du Vercors à ceux, qui se trouvent sous des séries de végétation comparables sur la face sud du Mont Ventoux. Ces séries sont en effet sous des influences méditerranéennes nettement plus marquées que dans le Vercors.

Mentionnons d'abord quelques caractères lithologiques, géomorphologiques, climatologiques et phytogéographiques originaux de ce massif.

3.1 - QUELQUES CARACTERES ORIGINAUX DU MONT VENTOUX

3.11 - ORIGINALITE D'ORDEE LITHOLOGIQUE

La morphologie des karsts du Vaucluse et du Ventoux a été étudiée par DEVUN (1968). Tout en formant un relief escarpé, le massif n'est pas uniquement constitué de calcaire dur. Les géologues y reconnaissent des alternances, d'une part, de calcaires compacts, parfois siliceux, généralement karstifiés à faciès titonique, tels qu'au Mont Serein et, d'autre part, des calcaires plus tendres, marneux et érodés. Ils les expliquent par une oscillation du fond de la Fosse vocontienne ; le Mont Ventoux correspond à la bordure sud de celle-ci (GIGNOUX, 1960). Ces alternances sont très visibles sur la face nord du massif. Cette montagne n'est donc pas uniquement constituée de calcaires compacts. Dans l'interprétation de la répartition des sols, cette notion d'ordre lithologique est importante.

3.12 - ORIGINALITE D'ORDEE BIOCLIMATIQUE

L'observatoire au sommet du massif apporte des données climatologiques précieuses. Elles sont résumées dans le tableau 4. Deux faits importants sont à noter.

TABLEAU 4 - DONNEES CLIMATOLOGIQUES CONCERNANT LE SOMMET DU MONT VENTOUX
(Période 1931 - 1960)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|---------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|------|-----|------|-------|-------|
| T. min. | -5,9 | -5,6 | -3,5 | -1,5 | 2,2 | 5,9 | 8,4 | 8,2 | 5,9 | 1,8 | -1,8 | -4,7 | 0,78 |
| T. max. | -1,5 | -1,2 | 0,5 | 3,0 | 7,2 | 11,6 | 14,4 | 13,9 | 11,0 | 6,4 | 2,4 | 0,4 | 5,61 |
| T. moy. | -3,7 | -3,4 | -1,5 | 0,75 | 4,7 | 8,75 | 11,4 | 11,05 | 8,45 | 4,1 | 0,3 | -2,55 | 3,20 |
| P | 72 | 41 | 72 | 67 | 94 | 75 | 38 | 74 | 102 | 131 | 115 | 85 | 966 |
| ETP | - | - | - | 7 | 48 | 81 | 97 | 84 | 54 | 25 | 2 | - | 318 |
| DR | - | - | - | - | - | 6 | 59 | 10 | - | - | - | - | 76 |

T min , T. max , T. moy : Températures minimales, maximales et moyennes ; mensuelles et annuelles en °C.

P : Précipitations mensuelles et annuelles en mm.

ETP : Evapotranspiration potentielle, d'après TURC, en mm.

DR : Déficit hydrique, en mm.

La répartition mensuelle des précipitations est également donnée sous forme de graphique sur la carte 2 page 9.

Le premier concerne les précipitations. Elles sont relativement abondantes : 966 mm/an. Elles sont cependant moins importantes, que dans l'étage subalpin du Vercors. Leur répartition, ainsi que celle des températures, donne origine à un déficit hydrique (P-ETP, Turc) de 6 mm, 59 mm et 10 mm respectivement en juin, juillet et août. C'est là l'influence du climat méditerranéen. Une autre influence de celui-ci se manifeste dans la grande irrégularité des moyennes annuelles. La température moyenne annuelle est basse : 3,20°C et la différence entre les deux versants nord et sud est probablement importante. La neige persiste, du 15 novembre au 31 mars, au-dessus de 1400 m, sur le versant sud et au-dessus de 1100 m, sur le versant nord.

Le deuxième fait important à signaler concerne les vents. C'est au Mont Ventoux, que le mistral manifeste son maximum de violence. On y mesure des vitesses du vent qui dépassent 290 km/h. C'est probablement là, un des facteurs importants dans l'évolution de la végétation et des sols du sommet.

En définitive, les conditions bioclimatiques du sommet du Mont Ventoux sont du type montagnard à subalpin. L'influence méditerranéenne se manifeste par un certain déficit hydrique estival et une irrégularité des moyennes annuelles. La violence des vents donne à la végétation du sommet un caractère pseudoalpin.

3.13 - ORIGINALITE D'ORDRE HISTORIQUE

L'histoire des interventions humaines au Mont Ventoux peut être résumée en deux étapes. La première consiste en une dégradation très intense et probablement très ancienne, dont on possède, d'après GOBERT et PAUTOU (1969), des documents depuis 1520. Sous les conditions climatiques peu favorables au rétablissement de la végétation, l'homme est intervenu une deuxième fois, pour reboiser et un siècle de restauration forestière constitue l'autre étape. Les essences introduites dans le massif sont le Pin noir d'Autriche, le Cèdre, le Pin sylvestre et le Pin à crochets.

3.14 - LES ETAGES DE VEGETATION AU SOMMET DE LA FACE SUD DU MONT VENTOUX

Rappelons que ce qui nous intéresse ici, ce sont les séries de végétation comparables à celles étudiées dans le Vercors, c'est à dire le pseudoalpin, le subalpin et le montagnard. Dans ces étages, les sols ont été examinés sur la face sud, là où les conditions méditerranéennes sont les plus marquées.

Les séries et étages sont schématisés dans la figure 14. Celle-ci est due à GOBERT et PAUTOU (1969). Comme dans le Vercors, le montagnard débute à sa base par la série mésophile du Hêtre. C'est une hêtraie sèche, pauvre en espèces. La strate herbacée est presque inexistante. La hêtraie-sapinière plus hygrophile n'existe que sur la face nord et non sur la face sud. Il convient de remarquer aussi l'absence, dans ce massif, de la pessière. La limite sud dans les Préalpes françaises de son aire d'extension se situe dans le Vercors.

A la série de la hêtraie mésophile, fait donc suite, sur la face sud du Ventoux, la série du Pin à crochets (*Pinus uncinata*). Elle correspond à la partie supérieure de l'étage montagnard et au subalpin. Dans le montagnard, elle est représentée par des forêts de Pin spontanées, qui ont été étendues, à la suite de reboisements récents. Dans le subalpin, au delà de 1650-1700 m, les bois de Pins s'éclaircissent. Ils sont remplacés par des pelouses de dégradation avec *Sesleria coerulea*, *Poa alpina* et avec *Juniperus communis*.

Au delà, les conditions pseudoalpines favorisent l'extension de la dégradation et de l'érosion. Les sols deviennent de plus en plus squelettiques. La végétation, dépourvue d'arbres, a des caractères communs avec celle des éboulis actifs du Haut Plateau du Vercors (*Talaseetum rotundifolii violetosum*). Au sommet, c'est le *Carex rupestris* qui correspond aux conditions les plus défavorables.

En définitive, de ces données phytogéographiques, puisées essentiellement des travaux des botanistes grenoblois, il convient de retenir, que la végétation de la face sud du Mont Ventoux a des points communs avec la séquence du Vercors du sud ; mais elle s'en différencie par deux points importants :

- Elle est plus appauvrie et plus sèche et c'est là un effet des conditions méditerranéennes. Cela se manifeste par la pauvreté du sous-bois et par l'absence de certaines séries, telles que la hêtraie-sapinière ou la pessière.

- Elle est plus dégradée : c'est l'influence des conditions pseudoalpines et en particulier de l'effet du vent et d'une longue action néfaste de l'homme. La dégradation se manifeste par le remplacement de la hêtraie mésophile et de la pinède à crochets, par des landes ou des pelouses sèches, pauvres en espèces, clairsemées, et favorables à l'érosion.

3.2 - EVOLUTION DES SOLS DANS LES ETAGES PSEUDOALPIN, SUBALPIN ET MONTAGNARD DE LA FACE SUD DU MONT VENTOUX

3.21 - L'ALTERATION DU CALCAIRE

Dans ces karsts, soumis actuellement aux conditions de montagne, deux phénomènes géomorphologiques essentiels façonnent le relief : la dissolution et la gélifraction. L'avantage de l'un sur l'autre donne origine aux lapiaz ou aux champs de pierres. Dans les étages subalpins ou alpins du Haut Plateau du Vercors, les deux formes étaient réparties en mosaïque, suivant les caractères lithologiques et en particulier la gélivité de la roche calcaire ou la topographie.

Comme dans le Vercors, le sommet du Mont Ventoux est une surface jeune. Le karst médian, est peu développé. Les formes géomorphologiques sont dues à des phénomènes récents ou actuels. Les surfaces sont soumises à la gélifraction et au déblayement des produits gélifractés. Leur prédominance sur la formation de lapiaz est due à l'alternance de calcaires tendres avec

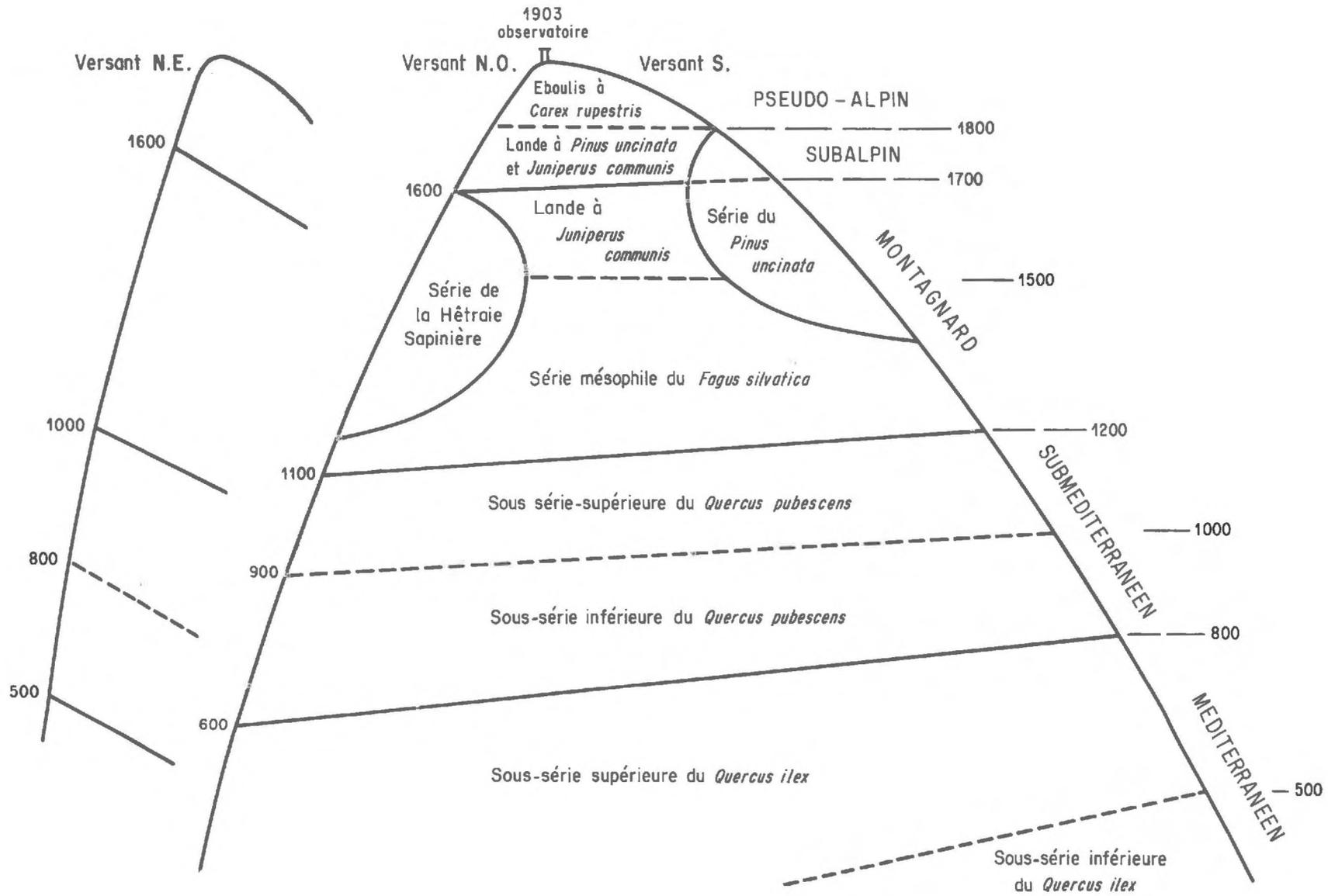


Figure 14 - Etages et séries de végétation du Mont Ventoux, d'après GOBERT et PAUTOU (1969)

des calcaires compacts et à la forte pente. Le sommet de ce massif est couvert sur la face sud d'un manteau continu de cailloux d'épaisseur variable.

Les zones d'altération physique du calcaire et de départ des produits gélifractés se situent aux sommets et le long des lignes de crêtes. Le manteau de cailloux calcaires y est peu épais. Il est constitué de pierres de grand diamètre, ou de blocs, à peine déboîtés de leurs alvéoles. La roche en place est proche de la surface et ses produits d'altération ont été, ou sont encore, continuellement déblayés. C'est le cas du squelette du litho-régosol^{*)} de la figure 15 B. Les thalwegs, par contre, constituent les cônes de déjection. La couverture de cailloux y peut dépasser trois mètres d'épaisseur. Le matériel est plus fin, davantage gélifracté pendant le transport. Un exemple de ce matériel est représenté, par le squelette des deux sols bruns calcaires, reproduits également dans la figure 15 en B. En définitive, ce sommet du Mont Ventoux est modelé, sur sa face sud, par des phénomènes récents et actuels du type périglaciaire. L'essentiel réside dans la gélifraction et le déblayement du matériel meuble.

Les deux schémas de la figure 15 correspondent à des coupes NS, du sommet, jusqu'aux abords de la hêtraie mésophile, sur la face sud. Le schéma 15 A correspond à une coupe, le long d'une ligne de crête, située entre deux thalwegs. Le manteau de gélifraction est peu épais ; il s'agit de zones de départ. L'altération du calcaire est plus superficielle au sommet qu'à des altitudes plus basses, où s'ébauche le karst médian. Les fissures sont en voie d'élargissement, par dissolution. Celle-ci reste cependant limitée. La coupe B est également orientée NS. Elle va du sommet, à des altitudes plus basses, le long d'un thalweg, où le manteau peu épais au sommet, comme précédemment, devient de plus en plus important.

C'est sur ces deux schémas géomorphologiques que sera calquée l'étude de la séquence pédologique. Il s'agit d'examiner d'abord brièvement la nature du matériel de remplissage karstique, qui s'est accumulé dans les rares fissures du karst moyen. C'est un matériel semblable à celui rencontré dans le Vercors et accumulé dans des sites comparables. Ce sont d'abord les argiles de décarbonatation. Leur structure est polyédrique anguleuse. La couleur est hétérogène : dans la plupart des cas, elle est ocre, comme dans le Vercors. Parfois, mais ce sont des cas exceptionnels, elle est rouge, comme dans les karsts méditerranéens (5 YR). Le matériel carbonaté est lui aussi, proche de celui rencontré dans le Vercors. Il s'agit de produits de gélifraction plus ou moins fins. Le karst du sommet du Mont Ventoux est peu développé, il est rempli de matériaux décarbonatés ou carbonatés, parmi lesquels certains ont une couleur rouge, semblable à celle des matériaux des karsts méditerranéens.

*) Terme non utilisé par la C.P.C.S.. C'est un lithosol, parce qu'il est très squelettique, mais aussi un régosol, parce qu'entre le squelette existe de la terre fine.

3.22 - DEUX SEQUENCES DE SOLS

L'évolution des sols est schématisée dans deux séquences A et B de la figure 15. Elle est exprimée en fonction de l'altitude et sous les différents étages de végétation. Les deux séquences ont en commun les sols du sommet ceux qui sont sous les éboulis à *Carex rupestris*. Un schéma de ce type de sol est reproduit dans la figure 15 B. Il s'agit de litho-régosols. En quoi diffèrent-ils de ceux rencontrés sous les pelouses alpines ou pseudo-alpines du Haut Plateau du Vercors (en particulier au sommet du Grand Veymont figure 1, E page 32). Dans les deux cas, le sol est peu profond (25 à 50 cm). Il se forme sur un matériel de gélifraction, plus ou moins déblayé par l'érosion. Dans les deux cas aussi, le sol est très squelettique.

Une première différence apparaît, par la présence au Mont Ventoux de terre minérale fine inférieure à 2 mm, entre les mailles du squelette. Sur le Haut Plateau du Vercors, le karst était encore vide parce que la surface était encore très jeune. Ici, elle est également peu évoluée; mais la présence de terre fine est due à des calcaires moins durs et moins purs que dans le Vercors.

Une deuxième différence importante est due à l'absence, au sommet du Mont Ventoux, d'horizon organique. Dans le Vercors, les sols étaient du type sols litho-calcaïques à mull-moder; l'horizon organique était constitué par un A₁, accumulé entre ou sur les cailloux. Ici, c'est un litho-régosol; le taux de carbone organique ne dépasse pas 2%; la structure de la terre fine est particulière, dès la surface et la couleur est claire (10 YR, 3/4 sol humide, 5/3 sol sec).

Enfin une dernière différence concerne la présence de CO_3Ca dans la terre fine. Dans le Vercors, le mull-moder était décarbonaté. Au Mont Ventoux la terre fine reste calcaire. Le CO_3Ca subsiste jusque dans les fractions limoneuses.

En définitive, au sommet du Mont Ventoux, l'altération physique et l'érosion l'emportent sur la pédogénèse. C'est l'absence de végétation qui en est la raison essentielle. La sécheresse estivale et la violence du vent ne permettent pas son installation.

Avec la diminution de l'altitude, les conditions pseudoalpines défavorables s'estompent de plus en plus et sont remplacées, par celles des étages subalpins et montagnards. C'est alors qu'apparaissent les deux types d'évolution des sols schématisés dans la figure 15. Sur roches-mères calcaires en place (la séquence A), l'horizon organique devient de plus en plus important et la terre fine est de plus en plus décarbonatée. On arrive à la même série de sols, que ceux rencontrés sous la hêtraie mésophile du Vercors: sols humiques carbonatés, rendzines brunifiées, sols bruns calcaïques parfois humifères. Ils sont répartis sous les pelouses à Genévrier, sous les pinèdes à crochets et sous la hêtraie mésophile d'altitude. Les caractères physico-chimiques et morphologiques de ces sols sont identiques, à ceux des sols rencontrés dans le Vercors.

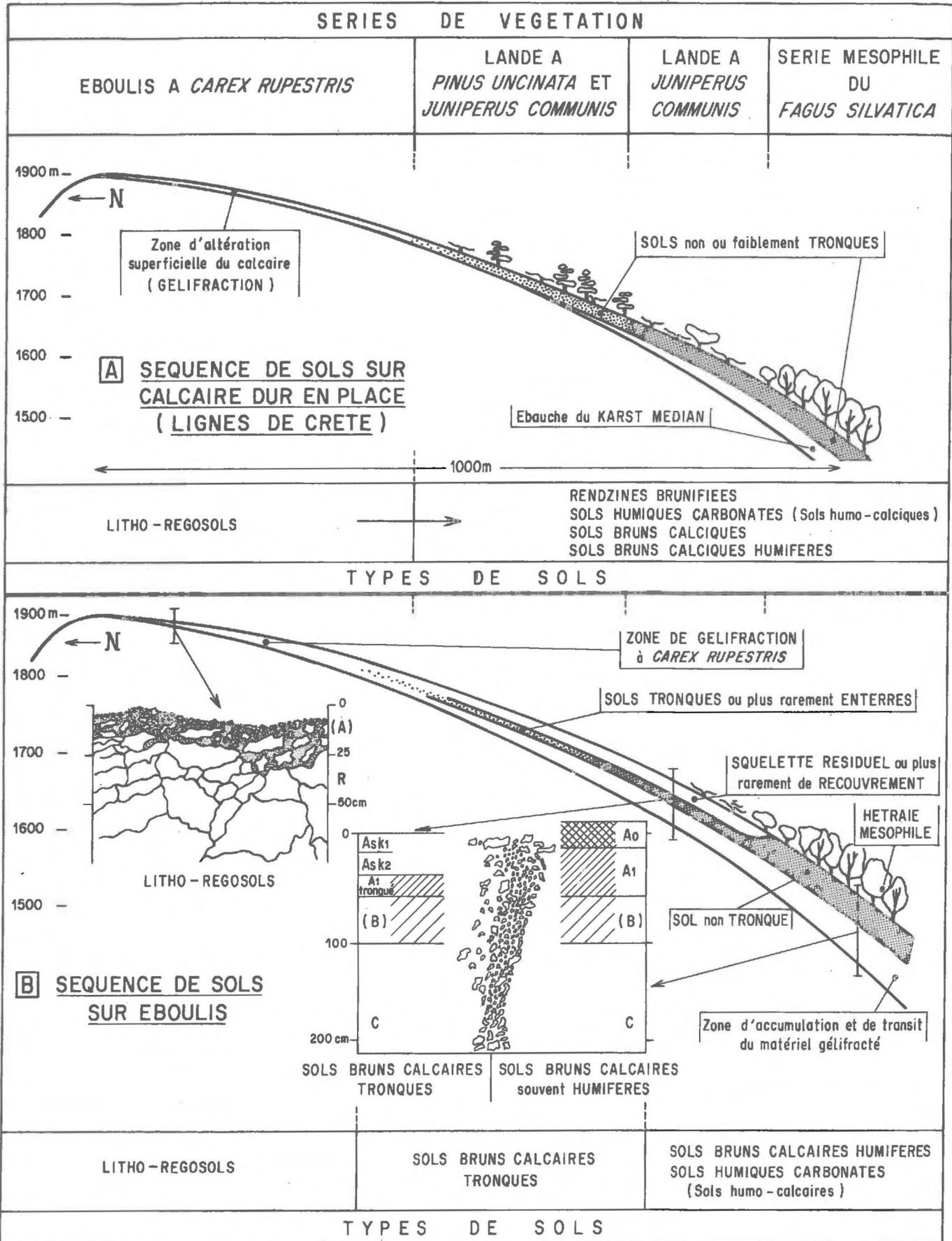


Figure 15 - Deux mésoséquences de sols de montagne, sur la face sud du Mont Ventoux. Géomorphologie - Sols - Végétation.

Comme dans ce massif, leur répartition est également hétérogène, suivant l'importance du matériel décarbonaté et la répartition des fissures du karst.

Sur les éboulis (séquence B), l'évolution est différente. Comme le montre la reproduction d'un sol brun calcaire, dans la figure 15 B, le squelette est important, et sous forme de cailloux de petites dimensions ; la terre fine est moins abondante et la décarbonatation est incomplète ; l'évolution s'arrête aux stades des sols bruns calcaires ou sols humo-calcaires. La présence d'un squelette favorise la formation d'horizons A₀ ou de mullis riches en matière organique, comme dans le Vercors.

Sur ce matériel, la disparition de la forêt et l'extension des conditions pseudoalpines sont plus défavorables au sol, que sur les calcaires en place de la séquence précédente. En effet, sur ces éboulis très squelettiques, la végétation herbacée ou arbustive s'installe plus difficilement. Le sol est facilement érodé. Ceci amène la tronquature, fréquemment observée, des sols bruns calcaires et représentée dans la figure 15 en B. Il ne subsiste de l'horizon tronqué, qu'une accumulation de cailloux résiduels. Cet horizon est appelé par GRACANIN (1963), A_{sk} (sk = skeleton). Sur le plan phytogéographique, la destruction du sol est accompagnée de l'extension de la végétation à *Carex rupestris*, vers les basses altitudes, là, où sur calcaire en place, se maintiennent les landes avec *Pinus uncinata* et *Juniperus communis* (figure 15).

3.3 - CONCLUSION

Le dépouillement des résultats d'analyses des sols provenant du Mont Ventoux n'a pas apporté davantage de renseignements, que ceux exposés et commentés dans les chapitres consacrés aux sols du Vercors. Ces résultats ne seront donc pas présentés ici.

L'intérêt de l'étude des sols sur la face sud du sommet du Mont Ventoux était de saisir l'influence des conditions méditerranéennes, ici plus importantes que dans le Vercors. Il faut tout d'abord écarter l'hypothèse d'une rubéfaction actuelle dans la zone étudiée. Cette question se posait à la suite des travaux de LAMOUREUX (1967). Il constate, sous les conditions méditerranéennes des montagnes du Liban, la formation de sols rouges actuels sur calcaires compacts. Il définit les aires climatiques correspondant à la rubéfaction actuelle. Celle-ci seront présentées et discutées dans le chapitre suivant, consacré aux sols rouges du midi de la France. Il faut retenir ici, que les conditions climatiques du Mont Ventoux ne correspondent pas du tout aux aires de rubéfaction actuelle, définies par LAMOUREUX. En particulier, les températures moyennes annuelles sont ici beaucoup trop basses. Nous avons vu précédemment, que les sols rouges sont rares au Mont Ventoux. Il s'agit d'un matériel ancien piégé dans le karst. Il n'y a pas de rubéfaction actuelle et la pédogénèse est du type alpin.

Cependant, ces sols diffèrent de ceux rencontrés dans le Vercors. Il faut d'abord répéter, que du Vercors au Mont Ventoux, à part les variations

climatiques, dues aux influences méditerranéennes, d'autres modifications de facteurs sont intervenues. C'est ce qui en général complique les comparaisons de ce genre. Il faut citer l'action du vent, très importante au Mont Ventoux, par la proximité de la vallée du Rhône. La dégradation a aussi été plus forte, que dans le Vercors. Enfin l'alternance de calcaires durs et tendres a favorisé la gélifraction. Celle-ci intervient dans la répartition des sols.

Comparons cependant les sols et la pédogénèse dans ces deux massifs. Il y a un point de similitude : dans les deux massifs, les sols de la hêtraie mésophile sont tout à fait comparables. Le cas des sols sur éboulis, encore calcaires dans la terre fine, est plus fréquent au Ventoux, que dans le Vercors ; mais la pédogénèse est du même type. Le Mont Ventoux, par contre, est original par ses sols qui sont sous les conditions subalpines et pseudoalpines. C'est là que se manifestent l'effet du vent et la sécheresse estivale. Les champs de cailloux sont, sur le Haut Plateau du Vercors, recouverts d'un horizon A_0/A_1 , très riche en matière organique et dû au maintien de la pelouse alpine ou pseudoalpine. Celle-ci n'existe plus au Mont Ventoux et le sol est très peu évolué. Il est du type litho-régosol. Les champs de cailloux sont nus, dépourvus d'horizons organiques et le calcaire subsiste, dans la terre fine, jusque dans les limons. Ce sont les conditions pseudoalpines, particulièrement défavorables, qui donnent à ce sommet son originalité.

CHAPITRE IV

4. - LES SOLS PERSIALLITTIQUES A RESERVE CALCIQUE DU MIDI
DE LA FRANCE

Continuant vers le sud la séquence étudiée, on entre, au delà du Mont Ventoux, dans le domaine méditerranéen. Les problèmes pédologiques, qui se posent alors, sont différents de ceux qui ont été examinés dans les chapitres précédents.

Dans le Vercors et au Mont Ventoux, parce que situées en montagne, les surfaces karstiques sont relativement jeunes et déblayées par les glaciations récentes. Les sols peu évolués sont explicables par des phénomènes de pédogénèse actuelle ou récente, post-würm. La mise en évidence de séquences est relativement simple. Dans les karsts du midi de la France, les problèmes de pédogénèse sont plus complexes, pour deux raisons essentielles :

- Tout d'abord, il s'agit là de surfaces karstiques très anciennes. Elles ont conservé des marques de paléopédogénèse qui ne sont plus en relation avec les conditions bioclimatiques actuelles. Un des objectifs de ce chapitre est d'étudier les sols anciens.

- Par ailleurs, sur ce matériel ancien, évolué, il est difficile de mettre en évidence les phénomènes de pédogénèse actuelle. C'est le deuxième objectif proposé dans ce chapitre.

Celui-ci est constitué de quatre parties. D'abord seront analysées brièvement les données bioclimatiques et la végétation. La deuxième partie est un bref rappel concernant les karsts polygéniques du midi de la France. La troisième partie sera consacrée à l'étude de sols. Enfin, dans le dernier paragraphe sera examinée la question de la brunification actuelle des sols rouges anciens.

4.1 - RAPPEL DE QUELQUES DONNEES CONCERNANT LES CONDITIONS BIOCLIMATIQUES
ET LA VEGETATION

Cette partie sera traitée très rapidement, puisque l'essentiel des données a déjà été présenté au début de ce travail. Dans l'établissement de séquences, sur roche-mère calcaire compact, à travers le midi de la France, deux possibilités ont été envisagées. La première, sur le bord méridional de la Fosse Vocontienne : du Mont Ventoux à travers la Provence, la seconde dans le Languedoc : du sud des Grands Causses (La Montagne de la Seranne), aux massifs calcaires qui bordent la Mer Méditerranée (Massif de la Gardiole). Les deux transects sont, selon EMBERGER (1943), dans l'aire de végétation méditerranéenne et, dans les deux cas, on passe du climat méditerranéen humide à hiver froid au nord, au climat méditerranéen subhumide à hiver frais au sud (Climagramme pluviothermique du coefficient d'EMBERGER dressé par SAUVAGE 1960 et 1964).

Rappelons les séries de végétation données par DUPIAS et al. (1966), OZENDA (1966) et GOBERT et PAUTOU (1969):

DANS L'ETAGE MEDITERRANEEN

- + La série méditerranéenne du Chêne vert, dont les landes de dégradation à faciès normal permettent de distinguer
 - une sous-série inférieure avec Chêne Kermès
 - une sous-série supérieure en dehors de l'aire du Chêne Kermès et avec Genévrier oxycèdre
- + La série méditerranéenne du Chêne pubescent

DANS L'ETAGE SUBMEDITERRANEEN

- + La série subméditerranéenne du Chêne pubescent avec
 - une sous-série inférieure constituée par le *Querceto-Buxetum* infiltré de quelques espèces de la chênaie d'Yeuse,
 - une sous-série normale (encore appelée supérieure) qui est à rattacher au *Querceto-Buxetum* au sens strict.

Dans les étages subméditerranéens et méditerranéens, la végétation a été soumise à une dégradation intense et ancienne. Les premières phases de défrichement des bassins et d'utilisation intensive de la Sylva remontent, selon DUGRAND (1964) et NICOD (1967), à l'époque pré-romaine.

A chacune des séries citées ci-dessus, correspond actuellement une succession de phases de dégradation ou de reconstitution de la végétation. Leur dynamique a fait l'objet d'études phytosociologiques et écologiques récentes. Citons à ce sujet, pour la Basse Provence, les travaux de Molinier (1952, 1955), pour la feuille de Vaison la Romaine, ceux de GOBERT et PAUTOU (1969). Dans le Languedoc, il convient de mentionner BARRY (1960), pour les garrigues nimoises, LONG et al. (1958), TRABAUD (1962) et GUILLERM (1969) pour les garrigues montpelliéraines.

Un des objectifs de ce chapitre, sera aussi d'analyser la répercussion de la dégradation du tapis végétal, sur les caractères du sol. Dans ce but, quelques stades typiques de dégradation de la végétation ont été retenus lors de la prospection :

- + Pour la sous-série inférieure du Chêne vert
 - les bois ou taillis de Chêne vert
 - les garrigues à Chêne Kermès
 - les pelouses à Brachypode rameux

TABLEAU 5 - QUELQUES DONNEES CLIMATOLOGIQUES CONCERNANT LES MONTS DU VAUCLUSE ET LES GARRIGUES MONTELLIERAINES

La répartition mensuelle des précipitations de ces stations est également donnée sous forme de graphique sur la carte 2 page 8.

STATION DE MONTPELLIER - BEL-AIR (données élaborées par BRISSE et GRANDJOUAN (1970)^{*} à partir des données brutes de GARNIER) (période 1931 - 1960)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| T min. | 1,6 | 2,2 | 5,2 | 7,6 | 10,9 | 14,4 | 16,7 | 16,4 | 14,1 | 9,7 | 5,7 | 2,6 | 8,93 |
| T max. | 10,9 | 12,8 | 16,0 | 19,3 | 23,2 | 27,8 | 30,9 | 30,1 | 26,1 | 20,4 | 15,1 | 11,3 | 20,32 |
| T moy. | 6,2 | 7,5 | 10,6 | 13,4 | 17,0 | 21,1 | 28,8 | 23,2 | 20,1 | 15,0 | 10,4 | 6,9 | 14,6 |
| P | 54 | 30 | 83 | 57 | 58 | 36 | 20 | 40 | 102 | 102 | 76 | 34 | 752 |
| ETP | 23 | 34 | 58 | 80 | 115 | 138 | 146 | 126 | 86 | 55 | 29 | 21 | 912 |
| D H | - | 4 | - | 23 | 57 | 102 | 126 | 86 | - | - | - | - | 398 |

STATION DE SAINT-GELY-DU-FESC (d'après DUGRAND, 1964, période 1951 - 1960)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|------|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-------|
| P | 62 | 27 | 122 | 43 | 41 | 50 | 36 | 53 | 52 | 143 | 85 | 80 | 794 |

STATION DE SAULT-DE-VAUCLUSE (d'après l'Association Climatologique du Vaucluse. Périodes 1931 - 1960 pour P et 1965 - 1969 pour T)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|--------|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|------|------|-----|------|-------|
| T min. | 2,4 | 2,2 | 2,2 | 2,8 | 6,4 | 9,0 | 11,3 | 11,04 | 8,4 | 6,2 | 0,6 | 1,8 | 4,1 |
| T max | 6,8 | 7,5 | 11,0 | 14,3 | 18,4 | 21,8 | 25,3 | 24,4 | 20,5 | 17,7 | 9,6 | 6,38 | 15,4 |
| T moy | 2,3 | 2,6 | 5,5 | 8,6 | 12,4 | 15,4 | 18,3 | 17,7 | 14,5 | 12,0 | 5,2 | 2,3 | 9,7 |
| P | 42 | 42 | 66 | 77 | 74 | 67 | 51 | 41 | 83 | 84 | 105 | 74 | 806 |

STATION DE SAINT-CHRISTOL (d'après l'Association Climatologique du Vaucluse. Période 1931 - 1960)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-------|
| P | 86 | 75 | 94 | 91 | 97 | 68 | 42 | 46 | 102 | 132 | 141 | 127 | 1101 |

STATION DE BANON (d'après les données enregistrées par l'E.D.F, période 1936-1965)

| MOIS | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | ANNEE |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-------|
| P | 66 | 55 | 71 | 73 | 39 | 61 | 34 | 42 | 92 | 93 | 96 | 101 | 823 |

T min, T max, T moy = Température: minimales, maximales et moyennes mensuelles et annuelles en °C. P = Précipitations mensuelles et annuelles en mm. ETP = Evapotranspiration potentielle d'après TURC. D H = déficit hydrique.

^{*} - Document interne C.E.P.E. - C.N.R.S. 34 - MONTPELLIER.

+ Pour la sous-série normale du Chêne pubescent

- les bois ou taillis de Chêne pubescent
- les pelouses à *Brachypodium pinnatum*, *Bromus erectus*, *Festuca glauca* et *Koeleria vallesiacae*.

Les deux transects mentionnés au début du paragraphe ont été soumis à une reconnaissance sommaire ; mais trois régions ont été particulièrement étudiées. Il s'agit des Monts du Vaucluse, du Plateau de St Christol et des Garrigues montpelliéraines. Elles sont représentées sur la carte n°3 page 12 .

Elles ont été choisies pour deux raisons :

- l'une d'ordre géomorphologique : les trois régions correspondent à des surfaces karstiques très anciennes ;

- l'autre d'ordre phytogéographique : le but recherché a été exposé au début de ce travail : étudier les sols sous des séries de végétation les plus représentatives de la séquence. Dans le cas du midi de la France, il s'agit d'une part de la série normale du Chêne pubescent (celle-ci a son maximum d'extension dans les Monts du Vaucluse et sur le plateau de St Christol) et, d'autre part, de la série du Chêne vert. Ici ont été choisies les stations les plus sèches, là où le Chêne vert est accompagné de Chêne Kermès. Ce sont les stations les plus méridionales. Pour des raisons de coordination avec d'autres programmes de recherche (LOSSAINT, 1967), la série du Chêne vert a été étudiée dans les Garrigues montpelliéraines, d'une manière plus approfondie, qu'en Provence. Dans ce travail, il faut entendre par Garrigues montpelliéraines le massif de la Gardiole, le Causse d'Aumelas et les garrigues délimitées par la vallée de l'Hérault à l'ouest, celle du Lez à l'est, le Pic St Loup au nord et Montpellier au sud.

Dans ces deux régions, il existe un certain nombre de postes météorologiques Montpellier Bel-Air et Saint-Gély-du-Fesc pour les Garrigues montpelliéraines, puis à Sault-de-Vaucluse, Saint-Christol et Banon pour le Vaucluse. Les données recueillies et représentées dans le tableau 5 sont incomplètes et correspondent à des périodes différentes.

Les garrigues montpelliéraines appartiennent au climat méditerranéen subhumide à hiver frais. Le coefficient pluviothermique Q d'EMBERGER est, à Montpellier, de 85 et m (la moyenne des minima du mois le plus froid) + 1,8°C. La station de St Gély-du-Fesc, plus éloignée de la mer, est plus humide et probablement aussi plus froide.

Dans les Monts du Vaucluse, les précipitations sont plus élevées et les températures plus basses. Ces dernières ne sont enregistrées que depuis cinq ans. Cette période est trop courte pour permettre le calcul de coefficient pluviothermique d'EMBERGER.

En définitive, les sols sont examinés sous les deux types de végétation les plus représentatifs du midi de la France, sur roches mères calcaires dures : sous la série normale du Chêne pubescent et sous la série du Chêne vert. Pour ce dernier, ce sont les stations les plus méridionales qui ont été choisies, celles où le Chêne vert est accompagné de Chêne Kermès. La sous-série normale du Chêne pubescent se rapproche probablement du climat méditerranéen humide. La série du Chêne vert examinée correspond au climat méditerranéen sub-humide. Dans les deux régions, les sols ont été étudiés sous les principaux stades de dégradation ou de reconstitution de la végétation.

4.2 - RAPPEL DE QUELQUES DONNEES D'ORDRE GEOMORPHOLOGIQUE : LA COMPLEXITE DES KARSTS DU MIDI DE LA FRANCE

L'originalité et les caractères des karsts du midi de la France ont déjà été exposés au début de ce travail. Ici seront donc simplement rappelées quelques notions fondamentales nécessaires à la compréhension de la pédogénèse.

4.21 - HISTOIRE DES KARSTS DU MIDI DE LA FRANCE

Il convient de se remémorer les points suivants :

- Les premières marques de karstification remontent au crétacé moyen ; elles sont antérieures ou concomitantes à la formation de la bauxite de l'Isthme durancien. De ces surfaces bauxitiques, il ne subsiste actuellement plus que de rares lambeaux.

- La formation du relief actuel et la karstification ont débuté au Miocène et au Pliocène (NICOD, 1967).

- Au Quaternaire, on assiste au surcreusement des vallées et des réseaux souterrains.

- L'essentiel des surfaces karstiques elles mêmes n'aurait subi, à travers le quaternaire, que de faibles retouches. Aux périodes interglaciaires sont attribuées des phases de pédogénèse et aux périodes périglaciaires ou glaciaires, des phases de morphogénèse. De celles-ci, il subsiste des vestiges importants, tels que des champs de pierres, des lapiaz, des grèzes, des éboulis, et probablement l'accumulation de loess.

L'histoire des karsts du midi de la France est complexe. Les géomorphologistes y reconnaissent juxtaposées des formes tropicales et périglaciaires. C'est un karst polygénique. L'essentiel, pour le pédologue, c'est la stabilité des surfaces et leur aptitude à conserver des sols très anciens.

4.22 - COMPLEXITE MORPHOLOGIQUE DES KARSTS DU MIDI DE LA FRANCE

Dans le karst, quatre niveaux sont distingués. Ils sont représentés dans la figure 16. Celle-ci correspond à une coupe, d'une

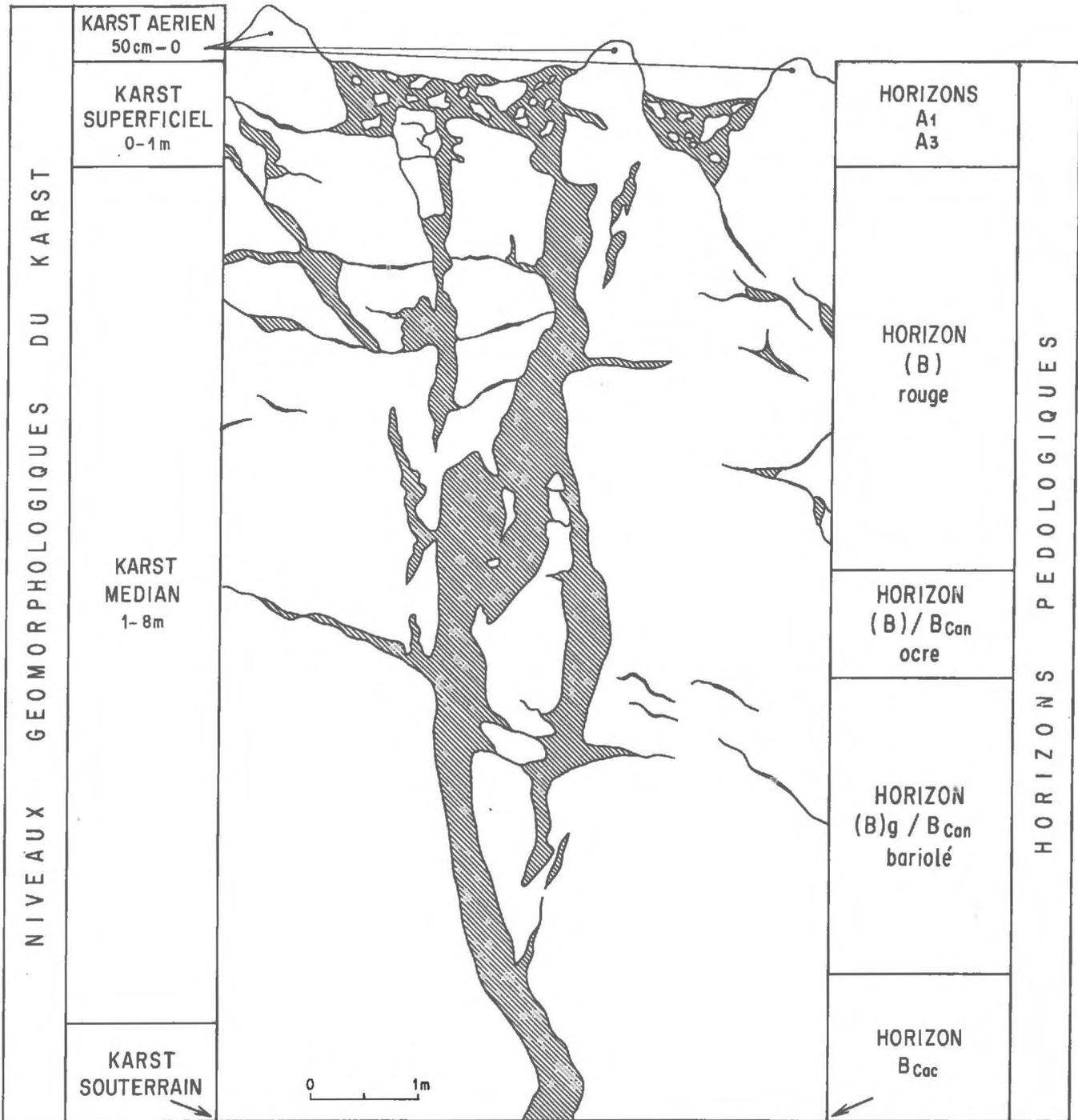


Figure 16 – Les niveaux géomorphologiques du karst. Un exemple de la répartition à travers le karst des horizons d'un sol fersiallitique à réserve calcique, à B_{Ca} et faiblement hydromorphe . (Profil N° L61 , La Colombière , Montpellier , CL $x=722,6$; $y=149,9$; altitude 90m).

dizaine de mètres d'épaisseur, examinée dans la carrière de la Colombière, au nord de Montpellier. La subdivision du karst et une partie des dénominations sont dues à LAMOUREUX (1967).

Le karst souterrain n'est pas représenté dans la figure. Il est constitué de galeries et de grottes, qui sont le domaine des spéléologues. De leur témoignage, il faut retenir deux points. Le réseau de galeries souterraines est polygénique ; il résulte de la superposition de plusieurs systèmes hydriques, provenant d'époques différentes et dont les cours ont été modifiés par les phénomènes tectoniques. Par ailleurs, ce réseau, formé par la dissolution ou par la turbulence des torrents et des cailloux a été ultérieurement ou est actuellement le siège de dépôts importants de concrétions calcaires, sous forme de stalactites, de stalagmites et de colonnes.

Rappelons que le karst souterrain du Vercors est très différent : le réseau de galeries est très simple ; il est monogénique. Les concrétions calcaires y sont peu développées ou absentes.

Au-dessus du karst souterrain s'est formé le karst médian, représenté dans la figure 16. Il s'est développé à partir des cassures dans la masse rocheuse, progressivement élargies par la dissolution. Il est fréquemment comblé de matériel de remplissage. Le karst médian est en général séparé du karst souterrain par des encroûtements calcaires importants, qui sont le prolongement vers le haut des stalagmites, stalactites et colonnes citées ci-dessus. Les caractères essentiels de ce niveau sont les suivants ; il ne contient pas ou peu de cailloux calcaires et ses parois sont très corrodées par la dissolution. C'est un niveau très stable. Trop profond, il n'a pas été touché par les remaniements périglaciaires superficiels, ni par les phases d'érosion récentes. La présence des encroûtements calcaires s'oppose à l'évacuation du matériel de remplissage du karst médian vers les galeries souterraines. C'est là que se sont conservés les paléosols.

Le karst superficiel (figure 16), par contre, est défini comme étant un niveau proche de la surface. Il a été remanié aux périodes périglaciaires et durant les phases d'érosion. C'est un milieu très caillouteux.

Le karst aérien est cette zone qui n'est pas enterrée sous le matériel de remplissage. C'est la roche calcaire qui affleure en surface. Il s'agit de champs de cailloux non comblés de terre fine ou vidés de leur contenu ou, comme dans la figure, de lapiaz anciens qui émergent.

La figure 16 représente le cas d'un karst très évolué, où les fissures sont très profondes. C'est un cas souvent observé, mais extrême. Il convient de retenir, que la répartition et la profondeur des fissures sont hétérogènes ; toutes les épaisseurs de sol sont possibles.

4.23 - LE MATERIEL DE REMPLISSAGE KARSTIQUE

L'origine du matériel de remplissage, dans ces karst très anciens, est discutée depuis longtemps : MARCELIN, (1942) ; BLANC, (1964) ; ROUSSET, (1967) ; STEINBERG, (1967) ; CADILLON, (1970).

Dans le Vercors, le problème était déjà posé. Dans ces karsts relativement jeunes, du moins dans les zones les moins évoluées, celles qui étaient en altitude, ce matériel était probablement d'origine autochtone.

Sur ces surfaces très anciennes, étudiées ici, des apports allochtones ont souvent été mis en évidence. Le matériel de remplissage karstique a trois origines.

- Le résidu de dissolution du calcaire compact, dont il a été question au début de ce travail.

- Des apports allochtones fluviatiles. Dans le Languedoc et les Grands Causses, il s'agit d'alluvions ou de colluvions siliceux, parfois très altérés, venus des plaines hercyniennes et déversés sur les surfaces calcaires, alors que les rivières étaient encore superficielles (MARRÉS, 1935).

De ce matériel, on ne retrouve actuellement plus que des quartzites roulés de toutes les dimensions et plus rarement des schistes et des arènes granitiques très altérées, comme l'a montré CADILLON (1970), dans le Causse du Larzac.

- Des apports éoliens. Ils ont été mis en évidence par MARCELIN et HUTTEN (1959) et ils sont probablement venus par la vallée du Rhône.

4.24 - CONCLUSION

Les karsts du midi de la France posent des problèmes très complexes, dont nous n'avons donné ici qu'une très rapide esquisse. Le but recherché était de mettre en relief quelques caractères, qui sont en relation avec les phénomènes de pédogénèse. Il convient à ce sujet de retenir les points suivants :

- Les surfaces karstiques du sud de la France sont très anciennes; grâce à l'existence de fentes et de galeries et à l'absence de réseau hydrique superficiel, elles ont capté des matériaux et conservé des sols très anciens.

- Pour la pédologie, deux niveaux importants sont à retenir : le niveau médian et le niveau superficiel. Le premier est stable, fortement décarbonaté, c'est là que se situent les horizons (B) et B des sols anciens. Le deuxième, par contre, a été fréquemment remanié. C'est la zone où se forment les horizons A et probablement le sol actuel.

- Le troisième point à retenir concerne le matériel de remplissage karstique. Dans le Vercors celui-ci était fréquemment calcaire, constitué d'éclats de gélifraction. C'est un matériel périglaciaire ou glaciaire. Ceci est plus rare dans le midi de la France. Les niveaux non remaniés ne contiennent en général pas de cailloux ; seuls les gros blocs subsistent et la terre fine est décarbonatée.

Il y a là deux explications possibles : ou bien c'est un matériel calcaire à l'origine, puis décarbonaté, ou bien il s'agit d'apports éoliens. Les deux sont vraisemblables.

- Enfin un dernier caractère à mettre en évidence c'est l'hétérogénéité de la profondeur et de la répartition des sols. Elle est propre aux surfaces karstiques. Elle a déjà été signalée à propos des sols du Vercors.

4.3 - ETUDE DES SOLS

Deux objectifs ont été proposés au début de ce chapitre. Le premier consiste à définir les sols anciens, ce but est relativement facile à atteindre ; il s'agit, sur ces calcaires compacts, de sols fersiallitiques à réserve calcique, appelés encore sols rouges méditerranéens non lessivés. Il existe sur ces sols des données bibliographiques abondantes, dont BOTTNER et LOSSAINT (1967) ont tenté de faire une synthèse. Dans ce travail, seront simplement mis en relief quelques caractères particulièrement intéressants de ces sols dans le midi de la France.

Le deuxième objectif est plus difficile à réaliser. Il s'agit de mettre en évidence l'activité actuelle de ces sols. Celle-ci est étudiée, sous les conditions méditerranéennes humides de la série du Chêne pubescent, d'une part et sous les conditions subhumides de la série de Chêne vert, d'autre part. Elle est aussi étudiée, sous les stades les moins dégradés de la végétation : les forêts ou taillis et sous les stades les plus dégradés : les pelouses.

Cet objectif n'a été atteint que partiellement. Cette étude permettra, en particulier, d'émettre un certain nombre d'hypothèses, qu'il conviendra d'élucider par des travaux ultérieurs. Les difficultés proviennent de l'existence des sols anciens. C'est un héritage de paléoclimats, qui ont marqué ces surfaces, pendant des périodes très longues et très anciennes. Ces marques de pédogénèse ne sont peut-être plus en relation avec les conditions bioclimatiques actuelles.

Pour ne pas alourdir ce texte et les figures, précisons de suite, que l'examen morphologique et le dépouillement des résultats d'analyses n'ont pas permis de mettre en évidence une différence significative entre les sols de la série du Chêne vert et

ceux de la série du Chêne pubescent. Les deux régions sont distinctes par leur climat et leur végétation. Elles ont en commun un karst très ancien dont l'hétérogénéité des formes rend les comparaisons difficiles. Elles ont aussi en commun l'existence de sols anciens. Les données provenant de ces deux régions seront donc présentées simultanément.

4.31 - LE PROFIL CALCAIRE

Considérons d'abord le calcaire dans le squelette, c'est-à-dire dans les fractions supérieures à 2 mm. Comme le montre la figure 16, dans ces sols rouges méditerranéens non lessivés, sur calcaire compact, karstifié, le CO_3Ca est présent à tous les niveaux. Il est sous forme de cailloux et de roche en place dans le karst superficiel, et sous forme de blocs et roche encaissante dans le karst médian. Pour la pédogénèse cette notion est importante ; c'est la réserve calcique, qui par ses surfaces de dissolution (LAMOUROUX, 1967), a été et continue à être mobilisable dans tous les horizons. C'est pour cette raison, que la CPCS (1967) a donné à ces sols fersiallitiques le qualificatif de "à réserve calcique". Ceci les distingue des sols fersiallitiques sans réserve calcique, tels que les sols rouges sur calcaires siliceux que nous étudierons dans un chapitre ultérieur.

Examinons maintenant le CO_3Ca dans les fractions inférieures à 2 mm. Quatre horizons sont distingués. Leur localisation, dans les niveaux du karst et dans l'ensemble du profil pédologique est représentée dans la figure 17 en A et B. On distingue du bas vers le haut :

- Un épais horizon d'accumulation calcaire sous forme de croûte. Il sera appelé dans la suite B_{Ca^c} (Ca = calcaire ; c = croûte). Il est situé à la base du karst médian et se prolonge dans le karst souterrain (figure 17 A et B).

- Un autre horizon d'accumulation calcaire à nodules, appelé B_{Ca^n} (n = nodules). Il surmonte le précédent (figure 17 A et B)

- Un horizon décarbonaté, qui occupe souvent la majeure partie du karst médian.

- Enfin, un horizon probablement décarbonaté à l'origine comme le précédent, puis recarbonaté à la suite de remaniements physiques, dont le karst superficiel fut le siège (figure 17 A et B). Reprenons en détail ces différents horizons.

LES HORIZONS D'ACCUMULATION CALCAIRE

Dans la figure 17, la croûte apparaît à la base des fissures les plus profondes. C'est le cas le plus général. Cependant, on observe parfois des croûtes calcaires, qui remontent jusque dans le karst superficiel,

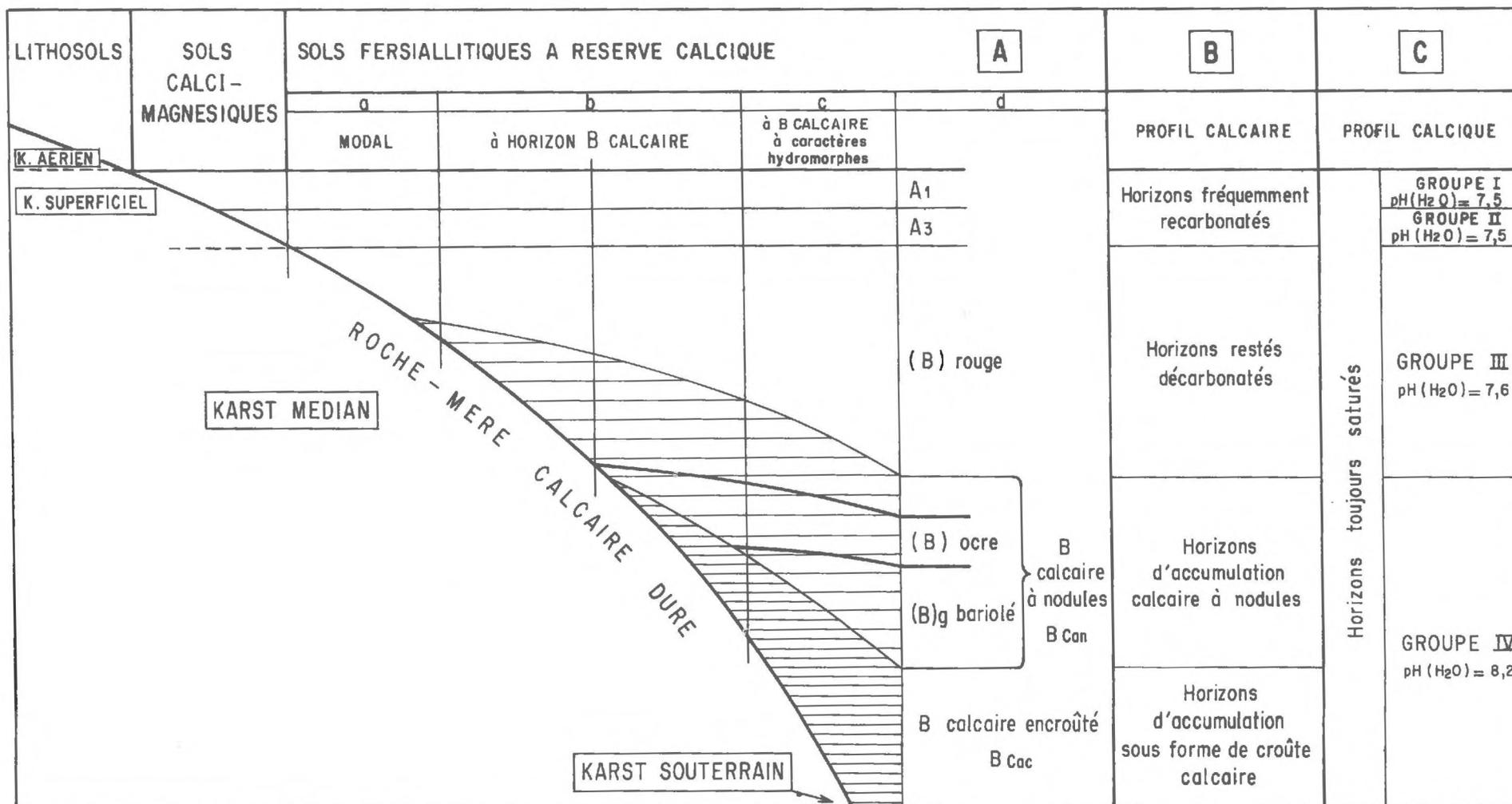


Figure 17 - Les sous - groupes des sols feriallitiques à réserve calcique .
 Organisation morphologique des profils . Profils calcaire et calcique .

les horizons A_3 ou même A_1 reposent alors directement sur celle-ci. C'est un cas fréquent en bas de pentes.

Morphologiquement ces croûtes ont une structure massive et une consistance extrêmement dure. Elles sont rarement feuilletées. Leur couleur est de 7,5 YR à 5 YR 6/6, 6/8. Elles présentent parfois des taches noires ferro-manganiques. Dans des cas plus rares, il s'agit d'encroûtements massifs d'aspect tuffeux. Ils contiennent, dans les deux cas, généralement plus de 70 % de CO_3Ca .

Dans la figure 17, l'horizon d'accumulation calcaire à nodules apparaît au-dessus de la croûte. Le passage de l'un à l'autre se fait progressivement. Les croûtes sont de plus en plus disloquées, à leur partie supérieure. Puis apparaissent des nodules anastomés, puis des nodules libres. Leur volume est rarement inférieur à 1 cm³. Ils sont durs et de couleur ocre ou rouge (7,5 YR à 5 YR). Leur surface est bien lissée. Ils sont très durs.

Ces horizons B calcaires sont probablement polygéniques. En effet, les croûtes sont parfois parcourues d'un réseau de canaux verticaux, comblés de matériel de remplissage karstique décarbonaté. Ces canaux sont fréquents, à la partie supérieure de la croûte et font la jonction avec l'horizon à nodules. Il s'agit là d'une remise en solution des carbonates, d'une destruction des horizons B calcaires, sous des conditions plus humides et qui datent peut-être des époques glaciaires.

LES HORIZONS DECARBONATES

Les caractères essentiels de ces horizons ont déjà été présentés. Ils sont localisés dans le karst médian, au-dessus des horizons BCa. A ces niveaux, la décarbonatation a été intense : les parois sont très lissées par la dissolution, le matériel de remplissage est décarbonaté et il n'y a plus ou peu de cailloux calcaires à ces niveaux (figure 16). C'est là le résultat d'une percolation très longue, plus ou moins intense, selon les conditions climatiques qui se sont succédées.

L'HORIZON RECARBONATE

La décarbonatation s'est certainement aussi exercée dans les horizons de surface. Mais ceux-ci ont été remaniés. Ils sont plus caillouteux, et la terre fine a été réalimentée en CO_3Ca . Cependant sur ces calcaires compacts, les teneurs de la terre fine en carbonates ne sont pas très importantes : elles ne dépassent en général pas 10 %. Dans la figure 18, est représentée la répartition du CO_3Ca , dans les fractions granulométriques 0-2 μ , 2 - 20 μ et supérieures à 20 μ . Elle correspond aux cinq échantillons d'horizons A_1 de sols fersiallitiques les plus calcaires qui ont été inventoriés sur ces surfaces. Quatre autres échantillons de rendzines sur calcaires tendres, dont il sera question

ultérieurement, ont été représentés sur la même figure, dans un but de comparaison. On constate, que les carbonates des horizons A_1 des sols fersiallitiques à réserve calcique sur calcaires compacts sont exclusivement localisés dans les fractions granulométriques supérieures à 20μ . La recarbonatation a donné origine à des cailloux calcaires et à du CO_3Ca dans les sables ; les carbonates ne se trouvent ni dans les argiles, ni dans les limons.

Le profil calcaire dans ces sols est probablement le résultat d'une action longue et complexe. Quatre groupes de phases sont actuellement encore reconnaissables.

- Des phases de karstification : celles-ci ont creusé les galeries, élargi et lissé les fissures, dans lesquelles se trouve le sol. Elles sont polygéniques et très anciennes : antéquaternaires.

- Des phases d'accumulation de calcaire dans le karst souterrain et à la base du karst médian. Elles sont naturellement postérieures aux phases majeures de karstification. Elles résultent d'une décarbonatation des niveaux superficiels et médians.

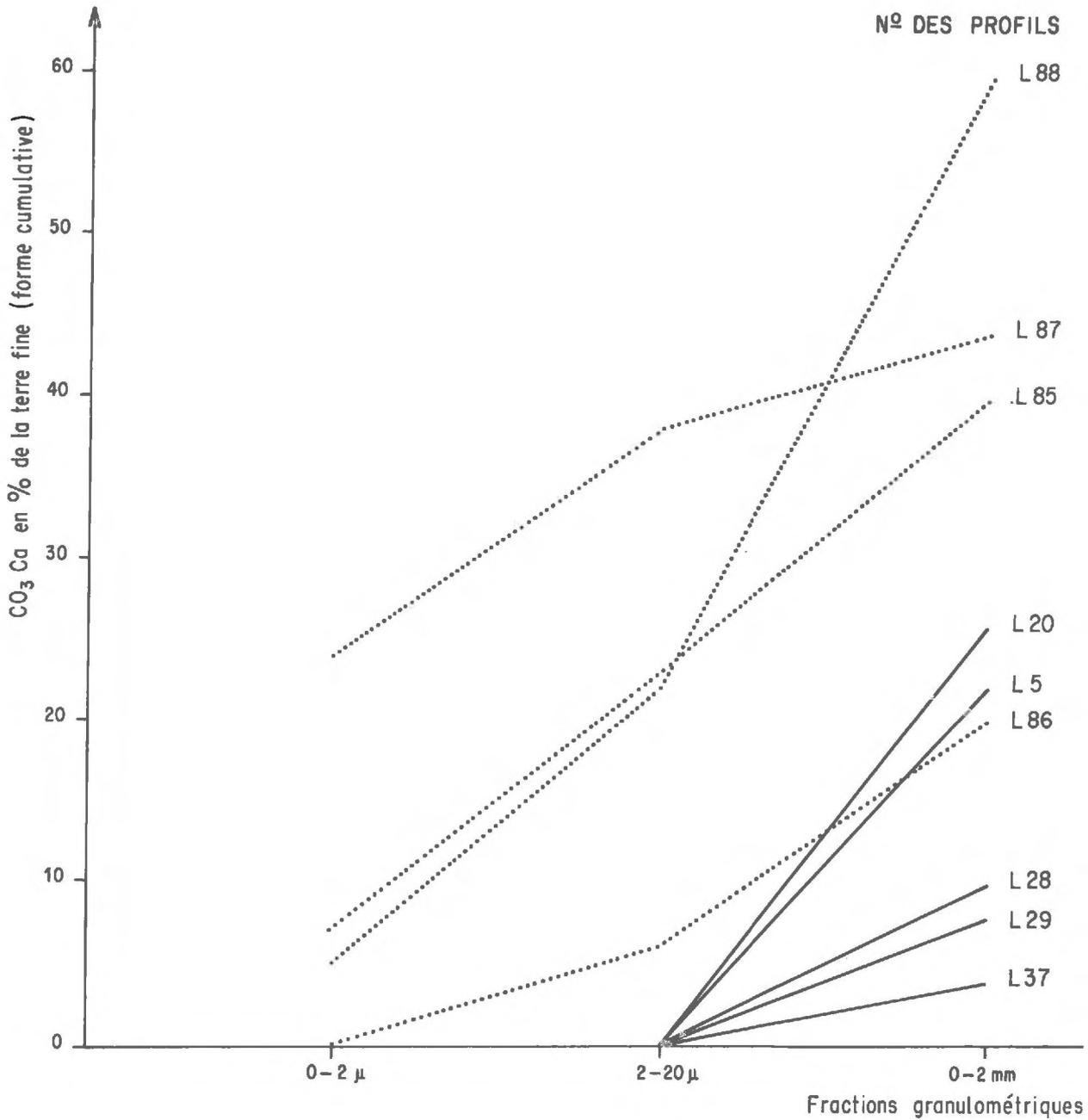
- Des phases de redissolution des dépôts calcaires. Elles ont probablement augmenté l'importance des horizons calcaires à nodules, par dissolution de la partie supérieure des encroûtements massifs. Elles ont aussi percé les croûtes, d'un réseau de canaux verticaux, qui constituent des exutoires. Il serait logique, d'attribuer ces phases, à des périodes glaciaires.

- Un dernier groupe de phases plus récentes, a remanié les niveaux superficiels du karst, soit par des phénomènes périglaciaires soit par des phénomènes d'érosion, tels que l'action de l'homme. La terre fine a été réalimentée en calcaire. Celui-ci n'a pas encore été complètement dissout, sous les conditions actuelles.

Ce ne sont là que quelques données et souvent que des hypothèses, concernant l'histoire de ces sols. Très peu d'indications sont à notre disposition, pour coordonner ces phases entre elles et pour les situer dans le temps, la paléoclimatologie et l'histoire de la végétation à travers le quaternaire. Des recherches mériteraient d'être entreprises dans cette voie.

Comparons les profils calcaires étudiés ici avec ceux examinés dans le Vercors.

- Dans les karsts méditerranéens, les niveaux médians sont plus évolués : les fissures sont plus nombreuses, plus élargies, plus corrodées que dans les karsts jeunes du Vercors ; c'est le fait d'une karstification très longue et ancienne.



LEGENDE

Sols ferralsitiques à réserve calcique
Horizons A₁ —————

Rendzines sur calcaires tendres
Horizons A₁

Figure 18 — La répartition des carbonates dans les fractions granulométriques des horizons A₁ recarbonatés des sols ferralsitiques à réserve calcique sur calcaires compacts et des rendzines sur calcaires tendres : CO₃ Ca contenu dans les fractions 0-2 μ, 2-20 μ et CO₃ Ca total (forme cumulative).

- Dans le Vercors, le matériel de remplissage karstique est récent, péri- et probablement post-glaciaire ; il est encore fréquemment calcaire, non encore décarbonaté aux niveaux médians. Ce cas est moins fréquent dans le midi de la France.

- Les profils calcaires sont dans le Vercors moins différenciés ; on y constate rarement l'existence d'horizons B_{Ca} . Les carbonates mis en solution sont éliminés des massifs. Dans les vieux karsts du sud, les encroûtements et les croûtes sont le résultat de dépôts d'époques probablement très longues.

- Ce sont les horizons de surface, qui permettent de mettre en évidence l'action des conditions bioclimatiques actuelles. Dans le Vercors, ils sont en général décarbonatés dans la terre fine. Dans le midi de la France, la dissolution est plus lente ; elle n'a pas encore éliminé complètement les carbonates, qui se trouvent dans les horizons de surface.

En définitive, dans les karsts méditerranéens, le profil calcaire est très évolué dans les niveaux médians et souterrains. Ce sont là des vestiges conservés de paléopédogénèses. Dans le Vercors, ce sont les horizons superficiels qui sont plus évolués, que ceux du sud de la France et c'est une manifestation des conditions bioclimatiques actuelles.

4.32 - LE PROFIL CALCIQUE

Tous les horizons des sols fersiallitiques à réserve calcique sont saturés. En effet, dans tous les échantillons analysés, les valeurs obtenues pour S étaient nettement supérieures à celles correspondant à T. La différence s'est ici avérée importante. L'acétate d'ammonium met donc en solution, lors de l'extraction des bases échangeables, une certaine quantité d'ions Ca^{++} à partir du calcaire qui subsiste dans la terre fine. Or, les valeurs obtenues pour le calcaire total, en particulier pour beaucoup d'horizons (B) étaient très faibles, de même celles correspondant au calcaire actif. Il est possible, qu'il s'agisse là de CO_3Ca dissout à partir de la réserve calcique pendant les périodes humides et qui reprécipite partiellement pendant les périodes sèches. Cette faible quantité de carbonates est également mise en solution par l'acétate d'ammonium, lors de l'extraction des bases échangeables. Rappelons que la dissolution d'un gramme de CO_3Ca correspond en effet à 20 m.e.

Examinons les valeurs de pH (H_2O) et (KCl) à travers ces sols fersiallitiques à réserve calcique. Elles sont mesurées dans les quatre types d'horizons distingués dans le profil calcaire. Ceux-ci sont simplement numérotés de I à IV, puisque le profil calcique ne permet pas de les définir convenablement. Leur localisation, dans les niveaux du karst et dans le profil pédologique est représentée dans la figure 17 en C

- Le groupe I coïncide avec les horizons A_1 . Il est donc situé dans le karst superficiel et correspond à la partie supérieure de l'horizon

recarbonaté du profil calcaire. Le pH est mesuré sous Chêne vert d'une part et sous les pelouses à Brachypode rameux d'autre part.

Sous taillis de Chêne vert :

pH (H₂O) : moyenne = 7,5 ; écart-type = 0,3 ; n = 17.

pH (KCl) : moyenne = 6,8 ; écart-type = 0,2 ; n = 17.

Sous pelouses à Brachypode rameux :

pH (H₂O) : moyenne = 7,7 ; écart-type = 0,3 ; n = 14.

pH (KCl) : moyenne = 7,0 ; écart-type = 0,2 ; n = 14.

- Le groupe II, coïncide avec les horizons A₃. Il est donc également dans le karst superficiel et correspond à la base des horizons recarbonatés du profil calcaire. Les valeurs ont également été mesurées sous Chêne vert et sous Brachypode rameux.

Sous taillis de Chêne vert :

pH (H₂O) : moyenne = 7,5 ; écart-type = 0,3 ; n = 10.

pH (KCl) : moyenne = 6,8 ; écart-type = 0,3 ; n = 10.

Sous pelouses à Brachypode rameux :

pH (H₂O) : moyenne = 7,7 ; écart-type = 0,3 ; n = 10.

pH (KCl) : moyenne = 7,0 ; écart-type = 0,1 ; n = 10.

- Le groupe III se superpose aux horizons (B) rouges. Il est situé dans le karst médian et coïncide avec les horizons restés décarbonatés du profil calcaire.

Sous taillis de Chêne vert :

pH (H₂O) : moyenne = 7,6 ; écart-type = 0,2 ; n = 21.

pH (KCl) : moyenne = 6,8 ; écart-type = 0,2 ; n = 21.

Sous pelouses à Brachypode rameux :

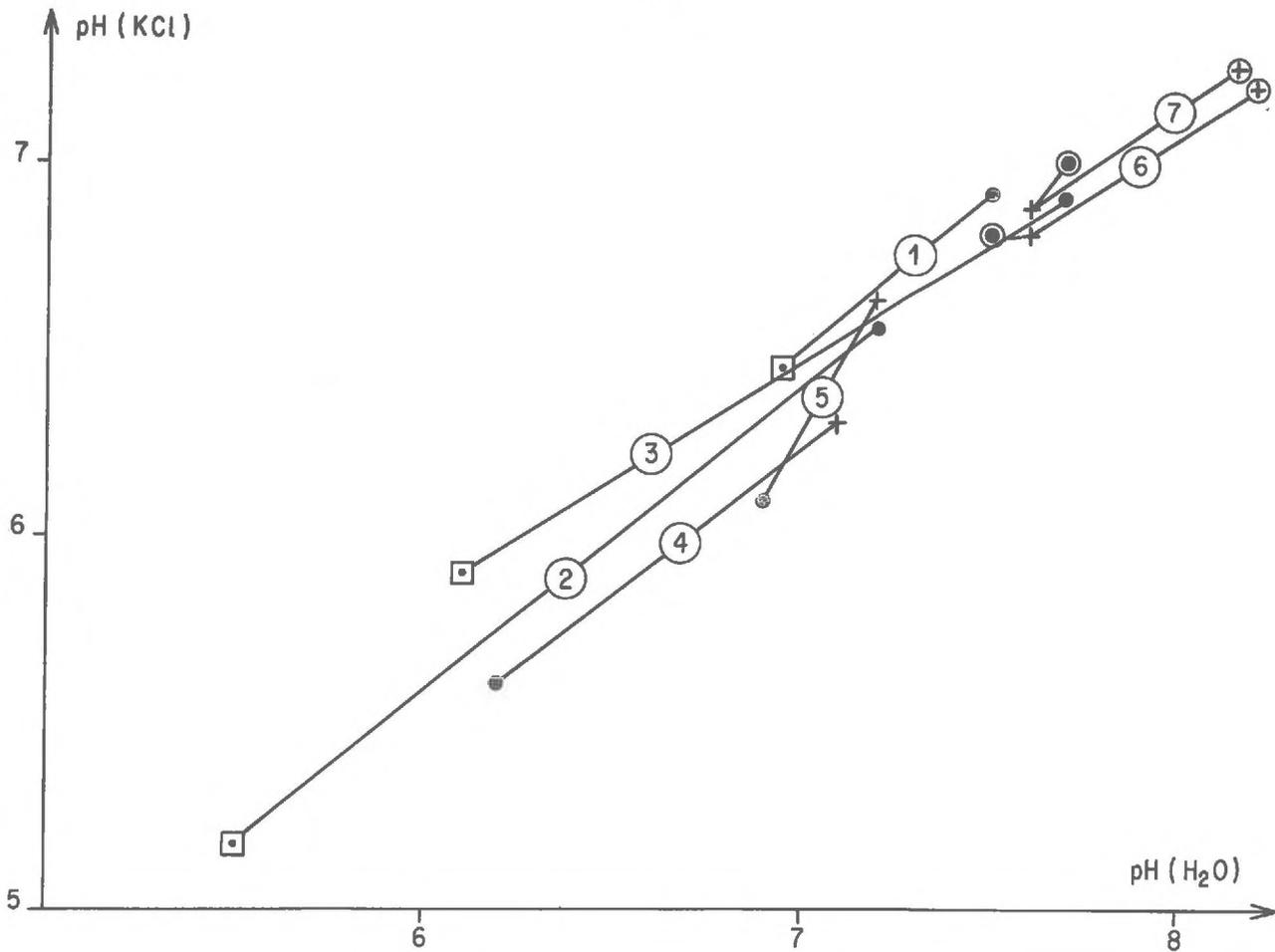
pH (H₂O) : moyenne = 7,6 ; écart-type = 0,2 ; n = 11.

pH (KCl) : moyenne = 6,8 ; écart-type = 0,1 ; n = 11.

- Le groupe IV correspond aux horizons B_{Can}. Les valeurs de pH sous les deux types de végétation ne sont plus distinctes. Elles sont présentées ensemble :

pH (H₂O) : moyenne = 8,2 ; écart-type = 0,3 ; n = 9.

pH (KCl) : moyenne = 7,2 ; écart-type = 0,2 ; n = 9.



| TYPES DE SOLS , SERIES DE VEGETATION , FORMATIONS VEGETALES | HORIZONS | | | |
|--|----------|--------|-----|-----------|
| | A0/A11 | A0/A12 | | |
| ① SOLS LITHO - CALCIQUES HUMIFERES A MULL - MODER SOUS PELOUSE ALPINE ET PSEUDOALPINE | □ | ● | | |
| ② SOLS LITHO - CALCIQUES HUMIFERES A MODER SOUS PESSIERE | □ | ● | | |
| ③ SOLS HUMIQUES CARBONATES SOUS HETRAIE | □ | ● | | |
| ④ SOLS BRUNS CALCIQUES SOUS PESSIERE | | ● | (B) | |
| ⑤ SOLS BRUNS CALCIQUES SOUS HETRAIE | | ● | | |
| ⑥ SOLS FERIALLITTIQUES A RESERVE CALCIQUE SOUS FORETS OU TAILLIS DE CHENE VERT | | ● | A3 | (B) + Bca |
| ⑦ SOLS FERIALLITTIQUES A RESERVE CALCIQUE SOUS PELOUSES A BRACHYPODE RAMEUX | | ● | ○ | + ⊕ |

Figure 19 - Les valeurs de pH (H₂O) et (KCl) dans les principaux types d'horizons et types de sols sur roches - mères calcaires compactes.

Les conclusions qu'apporte l'examen de ces données sont de trois ordres :

- Dans les horizons A_1 (groupe I) et dans les horizons A_3 (groupe II), apparaît une différence significative entre les sols sous taillis de Chêne vert et ceux sous pelouses à Brachypode rameux. Les valeurs de pH (H_2O) et (KCl) sont plus faibles sous taillis que sous pelouses. Cette différence est vérifiée par le test t de STUDENT. Dans les horizons (B) (groupe III) par contre, elle n'est plus significative.

- Dans les sols fersiallitiques sous taillis d'une part et dans ceux sous pelouses d'autre part, on n'observe pas de variation du pH à travers les profils : c'est-à-dire que des horizons A_1 à A_3 puis à (B), les valeurs ne sont pas significativement différentes. Dans les horizons B_{Ca} , les pH sont par contre nettement plus basiques qu'en (B), les chiffres dépassent 8.

- Le dernier point concerne la dispersion des valeurs, elle est donnée par l'écart-type : on constate, que dans les horizons recarbonatés (groupe I et II) c'est-à-dire en A_1 et A_3 , la dispersion des valeurs est plus importante que dans les horizons (B) (groupe III) non recarbonatés.

La figure 19 est une récapitulation. Elle présente les valeurs moyennes de pH (H_2O) et (KCl), pour les principaux types de sols examinés sur roches-calcaires compactes. Cette figure confirme ce qui a été exposé précédemment :

- Les valeurs de pH des horizons A_0 (sigle : \square) sont les plus faibles. Le complexe absorbant dans ces sols est désaturé.

- Parmi les mulls (sigle : \bullet), il convient de remarquer les faibles valeurs de celui des sols bruns calciques sous pessière ④. Ces horizons A_1 sont les seuls dont le complexe absorbant soit légèrement désaturé : $S/T = 80\%$. Tous les autres A_1 sont saturés. Cependant, le mull qui se trouve parfois sous l'horizon A_0 des sols litho-calcaiques à mull moder ② a également un pH nettement moins basique que celui des autres horizons A_1 .

- Parmi les horizons (B) (sigle : +), celui des sols fersiallitiques est plus basique que celui des sols bruns calciques.

- Les horizons B_{Ca} ont des valeurs de pH très élevées.

- Enfin confirmons une dernière observation déjà mentionnée : le gradient du pH est beaucoup plus faible de A_1 à (B) dans les sols fersiallitiques que dans tous les autres types de sols. Nous avons montré précédemment, que dans le premier cas sa variation n'est pas significative.

En définitive, sous les conditions bioclimatiques actuelles du midi de la France, la décarbonatation et l'élimination des ions calcium sont relativement lentes dans les sols fersiallitiques à réserve calcique.

4.35 - L'ENTRAÎNEMENT DES ARGILES ET DU FER, L'ÉTAT DU FER ET LA COULEUR DES HORIZONS

LA COULEUR DES HORIZONS

Concernant l'organisation morphologique des profils, des paragraphes précédents nous retenons l'existence, de bas en haut, de deux horizons B_{Ca}, l'un à encroûtement, l'autre à nodules, d'une série d'horizons décarbonatés, puis d'horizons recarbonatés en surface. Ce paragraphe débutera par un examen plus détaillé de la morphologie de ces sols fersiallitiques à réserve calcique. Elle sera confrontée aux résultats analytiques, concernant les indices d'entraînement des argiles, du fer et l'état du fer dans ces sols. Considérons d'abord le profil dans son développement le plus complet c'est-à-dire le sol fersiallitique à réserve calcique à B calcaire et à caractères hydromorphes. C'est celui qui est représenté dans la figure 16 puis schématisé dans la figure 17 en Ac. On observe les successions suivantes :

- Un horizon A₁, brun-rouge foncé (2,5 YR 3/4, 3/6 ; 5 YR 3/2, 3/3, 3/4, sols à l'état humide), à texture généralement limono-argileuse et à structure grumeleuse, d'une consistance dure à l'état sec. Il s'agit d'un mull calcique. C'est un horizon superficiel ; il est toujours très caillouteux. Son épaisseur varie de 10 à 50 cm. Généralement, il est recouvert d'un masque de cailloux résiduels d'érosion, épais de 2 à 10 cm et que GRACANTU (1963) appelle A_{sk} (sk = squelettique). Il arrive, que sur les pentes fortes, A_{sk} soit plus épais ; il constitue alors les champs de pierres, dont il a été discuté au début de ce chapitre. Sous ceux-ci, les horizons profonds subsistent.

- L'horizon A₁ brun passe très lentement au (B) rouge, par l'intermédiaire d'un horizon de transition, appelé A₃. La couleur brune diminue, la couleur rouge augmente. La structure est moins grumeleuse et plus polyédrique subanguleuse. La consistance reste dure. Cet horizon fait également la transition, entre le karst médian et le karst superficiel. Il est souvent encore très squelettique.

- Les horizons A₁ + A₃ varient de 50 cm à 100 cm. Au delà, la couleur est franchement rouge¹ (généralement 5 YR ou 2,5 YR 4/6, 4/8 et plus rarement 10 R 4/4, 4/6, 4/8 ou 3/6). La texture est argilo-limoneuse, la structure polyédrique anguleuse à subanguleuse, avec parfois une surstructure prismatique. Les facettes brillantes sont peu marquées. La consistance est peu fragile. Ces horizons sont souvent dépourvus de nodules calcaires. Il s'agit alors d'horizons (B) rouges (figure 16). Dans le profil calcaire, ils correspondent aux horizons restés décarbonatés. Cependant, comme le montre la figure 17 Ab, dans le cas de sols fersiallitiques, appelés "à horizons B calcaires", il arrive que la base de ces horizons rouges soit

occupée par les horizons B_{Ca} à nodules. Ceux-ci peuvent remonter, dans certains cas, très haut dans les horizons rouges. Il s'agit alors d'horizons complexes, appelés (B)/ B_{Can} rouges (figure 16). C'est un horizon calcaire B_{Can} , dans un horizon (B) rouge. Fréquemment, c'est aux horizons (B) rouges / B_{Can} que s'arrête le profil. On passe au-delà à la roche-mère en place R.

- Lorsque les fentes karstiques sont plus profondes, la couleur rouge devient progressivement ocre (7,5 YR 5/6). On assiste aussi à une individualisation du fer et du manganèse, sous forme de fines pellicules noires, très fragiles, qui tapissent les agrégats. Elles se distinguent très facilement des concrétions ferrugineuses arrondies, probablement plus anciennes. La texture reste argilo-limoneuse. La structure devient polyédrique nettement anguleuse fine. La consistance est peu fragile à l'état sec. Ces horizons ocres correspondent aux milieux confinés de LAMOUREUX (1966). Nous les appellerons (B) ocres. A ces niveaux déjà profonds du karst médian, il est rare de les observer, sans qu'ils soient accompagnés de nodules calcaires. C'est ce qui a été représenté dans la figure 17, en Ac, où les horizons (B) ocres se développent dans les horizons B_{Can} . Il s'agit donc encore ici, d'un horizon complexe que l'on pourrait appeler : (B)/ B_{Can} ocre (Figure 16).

- Toujours dans le karst médian et au-delà des horizons (B) ocres, la couleur change encore ; on passe de 7,5 YR à 10 YR et on arrive à l'horizon (B)g bariolé (figure 17 Ac). Deux couleurs sont réparties en mosaïque : des plages décolorées 10 YR 7/1 et des plages restées ocres. Texture et structure sont identiques à celles des horizons ocres. Marmorisées, ces horizons ne manifestent cependant pas d'illuviation secondaire. Il s'agit ici des milieux hydromorphes de LAMOUREUX (1966). Les nodules sont abondants. Ce sont également des horizons complexes, appelés dans la figure 16 : (B)g/ B_{Can} . Il est intéressant de remarquer, que les racines de Chênes vert descendent jusqu'à ces niveaux (10 m) et s'y ramifient finement, lorsque les nodules n'occupent pas un volume trop important.

- Au-delà des horizons (B)g/ B_{Can} , on arrive à la croûte, dont il a été question dans le profil calcaire.

Le profil, dans son développement le plus complet, est représenté dans la figure 16, où il est situé dans les différents niveaux du karst et dans la figure 17 en Ac. Il s'agit de sols à B calcaires et localement à caractères hydromorphes. Deux conditions sont nécessaires pour permettre le développement d'un tel sol : d'une part, il faut des fissures très profondes, c'est-à-dire des niveaux médians épais et d'autre part, la circulation de l'eau à travers le karst doit être entravée, pour provoquer la formation des milieux confinés puis hydromorphes. Ces conditions ne sont évidemment pas toujours réalisées. Il existe, à travers ces karsts

du midi de la France et dans le groupe des sols fersiallitiques sans réserve calcique, une grande diversité de sous-groupes. Ceux qu'il conviendrait de retenir dans une classification sont représentés dans la figure 17 en Aa, b, c. Trois sous-groupes ont été retenus :

- Le sol fersiallitique à réserve calcique modal. Il est constitué d'horizons A_1 , A_3 et (B) rouges non calcaires ; ce type de sol est fréquent et correspond aux fissures bien drainées et peu profondes : c'est le profil Aa de la figure 17.

- Le sol fersiallitique à réserve calcique à horizon B calcaire. L'horizon calcaire est souvent constitué d'un B_{Ca} , c'est-à-dire à nodules. Mais on observe parfois la remontée de la croûte Ca , jusque dans les horizons (B) rouges et même jusqu'en A_3 . Dans les profils de ce sous-groupe, la couleur rouge persiste parfois, jusqu'à des profondeurs importantes, mais il n'est pas rare d'y observer des horizons de couleur ocre.

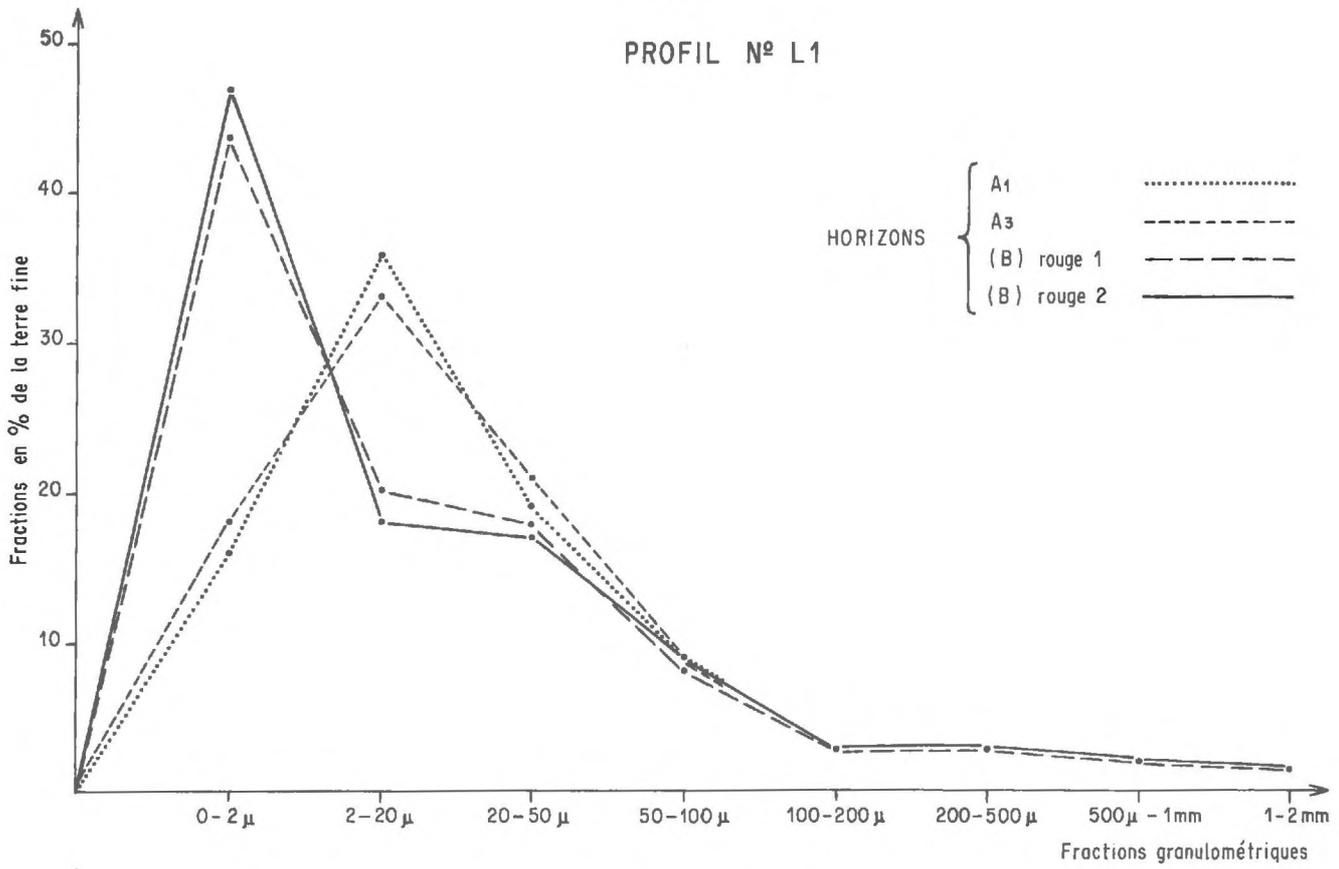
- Lorsque dans les horizons profonds, apparaît une marmorisation, on est dans le sous-groupe "à B calcaires et à caractères hydromorphes". Ce sous-groupe a été utilisé dans la description morphologique précédente.

Précisons aussi, que chacun de ces sous-groupes peut être brunifié. Ce cas sera discuté à la fin de ce chapitre.

Concernant la figure 17, certaines remarques s'imposent. La première a déjà été abordée précédemment ; elle concerne les horizons B_{Ca} . Ils apparaissent en général dans les fissures profondes. Mais il n'est pas rare, de les voir remonter, jusque dans les horizons A_3 et même A_1 . Une autre remarque concerne les horizons (B) ocres et ceux à caractères hydromorphes. A l'inverse des horizons B_{Ca} , ils sont, dans la plupart des cas, uniquement liés aux niveaux profonds. Les horizons ocres et en particulier les hydromorphes, sont beaucoup moins fréquemment observés, que les horizons B_{Ca} . Le sous-groupe à B calcaire et à caractères hydromorphes est assez rare. Notons aussi, qu'il n'est pas possible de donner une profondeur, même approximative, à partir de laquelle, apparaissent les horizons à nodules, encroûtés, ocres ou hydromorphes. Elle dépend, ou dépendait, de la circulation souterraine des eaux ; elle est donc extrêmement hétérogène. Les horizons B calcaires montent plus haut dans le profil, que les horizons ocres ; mais il n'est pas possible de donner ici des valeurs absolues de leur profondeur.

Une dernière remarque concerne les sols appelés dans la figure 17 "sols calcimagnésiques". Ils sont superficiels et du type A₁R ou A₁A₃R. A_1 et A_3 sont plus ou moins calcaires et leurs caractères morphologiques sont comparables, à ceux des horizons superficiels des sols fersiallitiques. Ou bien, il s'agit de sols bruns calciques ou calcaires ou bien, il s'agit d'un matériel rubéfié. Sur les calcaires durs karstiques, le deuxième cas est le plus fréquent. Le premier cas a été observé et nous y reviendrons plus loin.

PROFIL N° L1



PROFIL N° L57

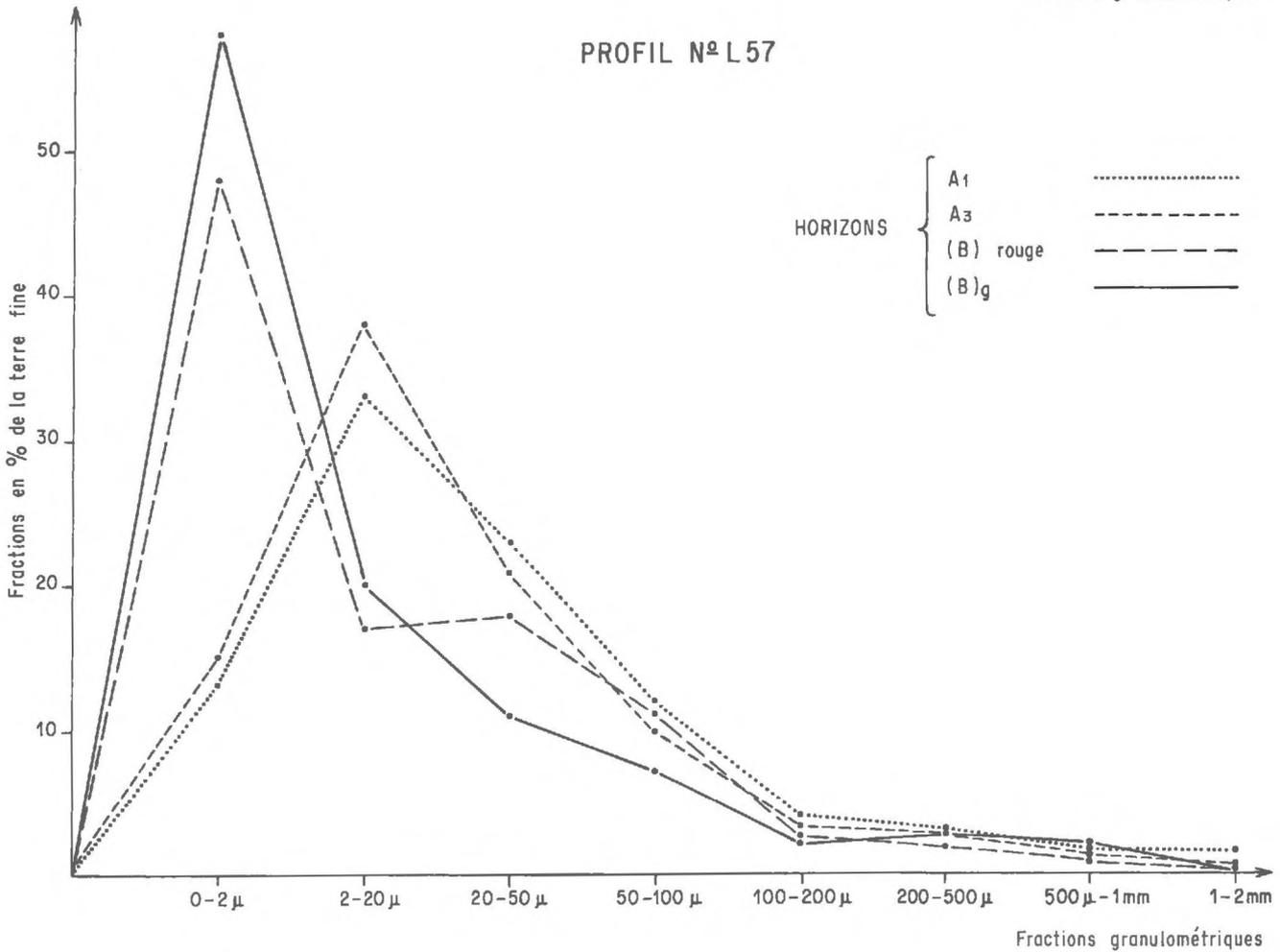


Figure 20 – Deux exemples de diagrammes granulométriques de sols fersiallitiques à réserve calcique.

Sur le plan cartographique, il est important de remarquer, que les sous-groupes qui viennent d'être présentés, sont répartis en mosaïque à travers les karsts du midi de la France. La raison en est la grande hétérogénéité des niveaux médians.

L'ENTRAÎNEMENT DES ARGILES ET DU FER

Les données morphologiques qui viennent d'être présentées, seront maintenant confrontées avec les résultats d'analyses, en particulier, en ce qui concerne la granulométrie et le fer. L'entraînement des argiles dans les sols fersiallitiques à réserve calcique pose deux problèmes fondamentaux, qui ont été mis en relief, au congrès de Pédologie méditerranéenne, à Madrid en 1966. Ils sont à peu près résumés ainsi :

- Certaines écoles, telles que l'école américaine, estiment que l'horizon B textural, très fréquent dans les sols fersiallitiques, est un horizon de diagnostic, c'est-à-dire qu'il est toujours lié à ces types de sols. Les pédologues français et en particulier ceux de l'O.R.S.T.O.M. par contre, pensent que dans certains sols fersiallitiques à réserve calcique existe un horizon (B) uniquement de structure et de couleur.

- Le deuxième problème concerne les mécanismes de la migration du fer, des argiles ou des limons. On pense, que les processus de migration, mis en évidence dans les sols des pays tempérés, ne permettent pas d'expliquer suffisamment l'appauvrissement des horizons supérieurs des sols rouges lessivés. Certaines hypothèses sont avancées, telles que celles proposées par DAN et YAALON (1966) et par BOULAINÉ (1967).

L'analyse granulométrique a été réalisée dans une cinquantaine de profils de sols fersiallitiques à réserve calcique. Il n'a guère été possible de représenter, sous forme de graphique, l'ensemble des résultats. La figure 20 donne les fractions de deux profils, jugés suffisamment représentatifs de l'ensemble des sols examinés. Elle exprime les fractions granulométriques de la terre fine non décarbonatée. Voici les teneurs en calcaire total de ces deux échantillons :

| | | | | |
|-------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| - Profil L 1 : Horizons | A ₁ | A ₃ | (B) ₁ | (B) ₂ |
| CO ₃ Ca total en % | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,6 |
| - Profil L 57 : Horizons | A ₁ | A ₃ | (B) | (B) _g |
| CO ₃ Ca total en % | 5,5 | 0,5 | 0,4 | 5,7 |

Rappelons que ce calcaire se trouve essentiellement dans les fractions sableuses.

Dans cette figure on constate les faits suivants :

- Les fractions granulométriques supérieures à 100 μ sont très peu abondantes dans ces sols. C'est un cas général. Les exceptions rencon-

trées sont celles, où la réalimentation en CO_3Ca des horizons A_1 et A_3 augmente les fractions 0,5 à 2 mm. L'examen des sables non calcaires³ montre, qu'il s'agit fréquemment de grains de quartz bien arrondis. Ces sols sont donc essentiellement constitués d'argiles, de limons fins et grossiers.

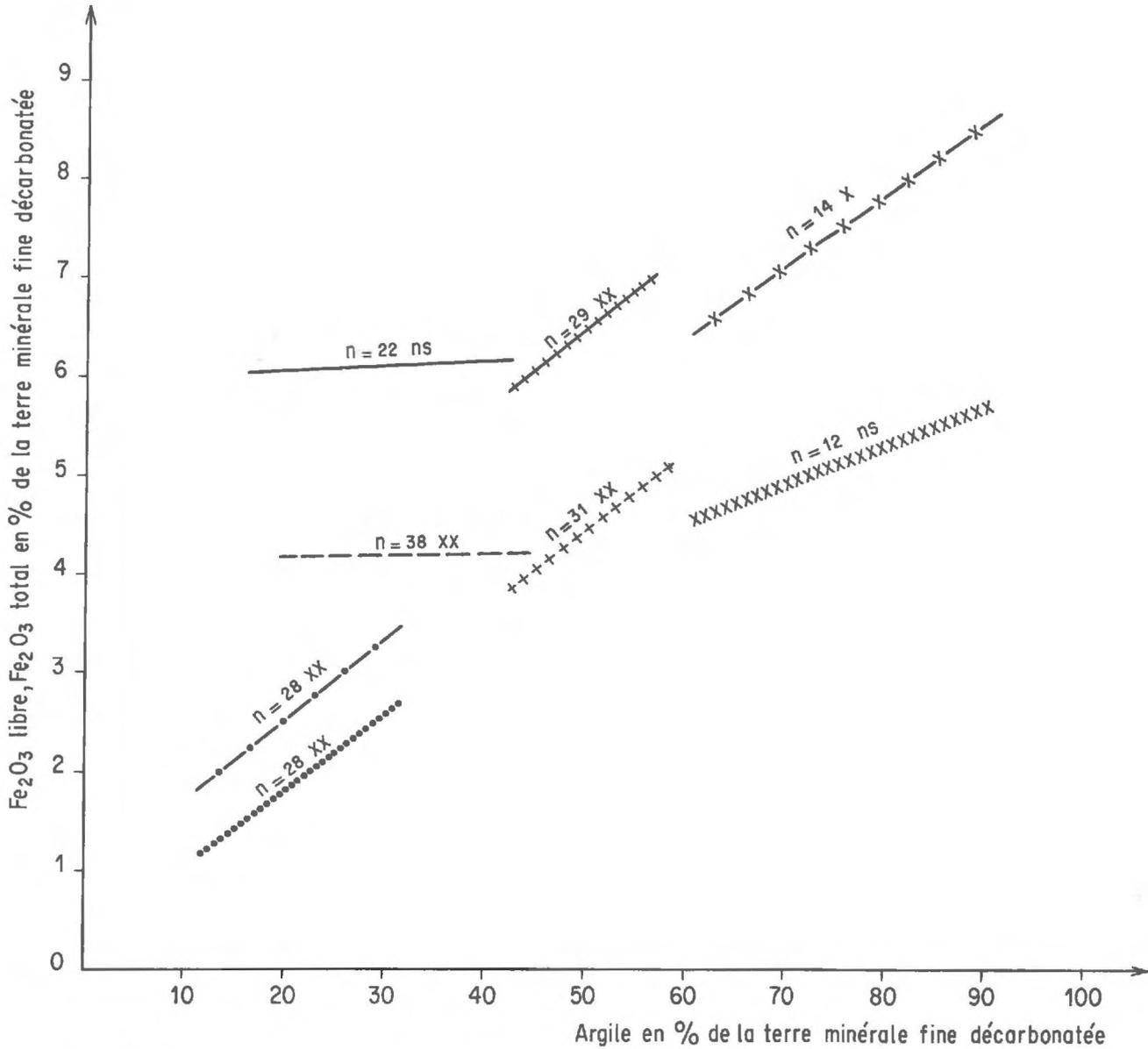
- Il existe une différence dans la granulométrie, entre les horizons $A_1 + A_3$, d'une part et les horizons (B), d'autre part. Elle apparaît parfois aussi entre A_1 et $A_3 + (B)$. Cette différence ne se manifeste pas dans les fractions grossières. Elle intéresse les argiles et les limons fins (2 - 20 μ), pour le profil N° L 1 et les argiles et les limons fins et grossiers pour le profil N° L 57. Les horizons de surface contiennent plus de limons et moins d'argiles ; les horizons profonds contiennent plus d'argiles et moins de limons. Les fractions granulométriques plus grossières ne varient pas. L'augmentation des argiles, la diminution des limons 2 - 20 μ , et l'invariabilité des fractions supérieures à 50 μ s'avèrent, dans les trois cas, significatifs, par le test de STUDENT, pour l'ensemble des profils analysés.

Examinons la nature des limons. Dans les horizons A et (B) de deux profils, l'analyse, par diffraction des rayons X, a été effectuée, sur les argiles, d'une part et sur les limons (2 - 20 μ), d'autre part. Les diagrammes obtenus pour les deux fractions granulométriques sont, dans chaque horizon, absolument identiques. Précisons, que les échantillons n'ont pas été déferrifiés, avant l'analyse granulométrique, ni avant l'analyse minéralogique. Il est donc probable, que les fractions 2 - 20 μ soient des pseudo-limons. Ce sont des argiles cimentées. Ils sont plus abondants dans les horizons A_1 et parfois A_3 , que dans les horizons (B). Rappelons, que la dispersion des fractions granulométriques a été faite par agitation, après minéralisation à l'eau oxygénée et à chaud de la matière organique. Les échantillons n'ont pas été soumis aux ultra-sons.

Pour l'explication des faits, qui viennent d'être exposés ici, plusieurs hypothèses sont proposées.

- La première est géomorphologique. L'origine du matériel de remplissage karstique est hétérogène. La présence de grains de quartz roulés et parfois de gravier quartzitique témoigne d'apports fluviatiles. Des apports éoliens sont aussi soupçonnés.

- La deuxième hypothèse est basée sur la présence des pseudo-limons. On constate, qu'à travers tout le profil, une partie des argiles est cimentée en pseudo-limons. Ceux-ci sont cependant plus abondants dans les horizons de surface, que dans les horizons profonds. La nature du ciment n'est pas connue. Il ne s'agit vraisemblablement pas de calcaire, qui n'existe pas dans les fractions argileuses ou limoneuses. La matière organique pourrait jouer ce rôle. Mais elle a été minéralisée, avant l'analyse granulométrique. Le fer également pourrait servir de ciment. Ce problème n'est pas résolu.



LEGENDE

| | ARGILES / FER LIBRE | ARGILES / FER TOTAL |
|---|---------------------|---------------------|
| <u>SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE</u> | | |
| HORIZONS A ₁ , A ₃ | ----- | ————— |
| HORIZONS (B) | +++++ | +++++ |
| <u>SOLS FERSIALLITIQUES SANS RESERVE CALCIQUE</u> | | |
| HORIZONS A ₁ , A ₂ | | —●—●—●—●— |
| HORIZONS B | XXXXXXXXXXXXXXXXXX | —X—X—X—X— |

NS : Corrélation non significative
 X : Corrélation significative à 95 %
 XX : Corrélation significative à 99 %

Figure 21 — La répartition des argiles, du fer libre ou total dans les sols fersiallitiques avec ou sans réserve calcique.

- Le lessivage des argiles constitue une troisième hypothèse. Elle est vraisemblable, étant donnée la fréquence de l'entraînement des argiles, du fer et même des limons, dans la plupart des sols rouges du bassin méditerranéen. Cette troisième hypothèse sera discutée à partir de la figure 21. Celle-ci représente deux types de sols rouges : les sols fersiallitiques à réserve calcique, dont il est question ici et ceux sans réserve calcique, appelés encore sols rouges méditerranéens lessivés. Ils seront présentés ultérieurement et se trouvent sur les calcaires siliceux. Cette figure met en corrélation les teneurs en argiles, d'une part et celles en fer total et libre, d'autre part.

Les renseignements de cette figure, concernant les sols rouges lessivés (fersiallitiques sans réserve calcique), sont les suivants : le "lessivage" intéresse à la fois les argiles et le fer libre et total. Les indices d'entraînement sont élevés : jusqu'à 7. Pour ce qui est des sols fersiallitiques à réserve calcique, dont il est question ici, les résultats sont différents : on note de A à (B) une augmentation des argiles ; c'est une confirmation, concernant l'ensemble des profils, des résultats de la figure 20. Mais l'entraînement du fer libre ou total reste très faible : les indices varient de 1 à 1,3.

Alors que dans les sols fersiallitiques sans réserve calcique, à la fois le fer et les argiles sont fortement entraînés, dans ceux à réserve calcique, le fer ne migre pas, et les "indices d'entraînement" des argiles restent beaucoup plus faibles, que dans les sols précédents.

- Une quatrième hypothèse peut être également avancée. C'est celle de l'ablation par érosion, ou de prélèvements éoliens des fractions argileuses, dans les horizons de surface, ceux qui sont situés dans les niveaux remaniés superficiels du karst. Cependant, le prélèvement uniquement d'argiles est peu probable.

Retenons simplement que ces sols ont une histoire complexe, qu'ils sont probablement remaniés et que plusieurs phénomènes se sont superposés.

LE RAPPORT FER LIBRE/FER TOTAL

Comme il a été exposé précédemment, on assiste à travers les horizons (B), du haut en bas, à une succession de couleurs rouge, puis ocre, puis bariolée.

La question qui se pose est la suivante : les couleurs des horizons (B) des sols fersiallitiques sont-elles explicables par l'état du fer, c'est-à-dire la nature du fer cristallisé ou la présence ou l'absence de composés non cristallisés ? Nous serons brefs à ce sujet, puisque la réponse à cette question vient d'être donnée, par LAMOUREUX (1968), SEGALIN (1968, 1969) et enfin LAMOUREUX et SEGALIN (1969).

Présentons d'abord les résultats obtenus dans ce travail. Deux méthodes ont été utilisées. L'analyse, par diffraction des rayons X, apporte peu de renseignements; en ce qui concerne la nature du fer cristallisé. Les échantillons n'ont pas été débarrassés de leur fer amorphe et on observe un très léger pic, correspondant à la goethite. Il est présent dans tous les horizons (B), quelle qu'en soit la couleur; mais il n'est jamais important. Le fractionnement chimique des composés du fer a été réalisé par la méthode DEB. Elle a permis d'établir le rapport fer libre/fer total. Les résultats sont exposés dans la figure 22. Celle-ci exprime les rapports fer libre/fer total, dans les horizons de trois types de sols du midi de la France: les sols calcimorphes sur calcaires tendres, les sols fersiallitiques sans réserve calcique sur calcaires siliceux et enfin les sols fersiallitiques à réserve calcique sur calcaires compacts, dont il est question ici. Les valeurs absolues du fer libre et du fer total sont exprimées, en % de la terre fine, minérale, décarbonatée, c'est-à-dire abstraction faite de la perte au feu et du calcaire. Les corrélations, entre le fer libre et le fer total, sont représentées sous forme de droites de régression, délimitées par les écarts-types, de part et d'autre de la moyenne. Le nombre d'échantillons utilisés pour le calcul et les coefficients de corrélation sont également indiqués dans la figure.

L'examen des résultats permet de dégager les points suivants :

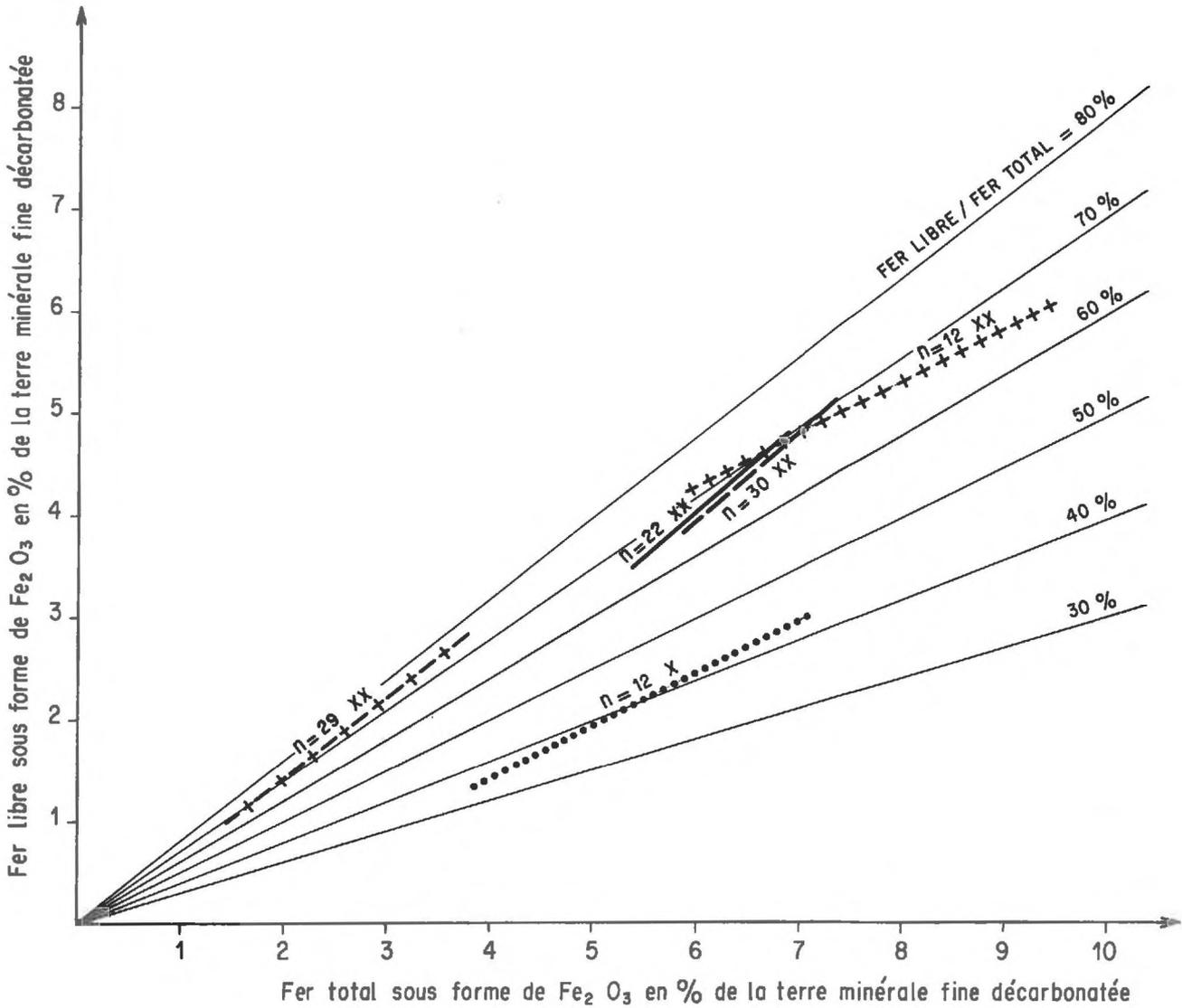
— Considérons d'abord les horizons (B) des sols fersiallitiques à réserve calcique. Des horizons rouges, aux horizons ocres, puis hydromorphes, les rapports fer libre/fer total ne varient pas d'une façon significative et dans la figure, ils sont regroupés autour d'une même droite; les valeurs varient de 65 % à 70 %.

— Dans les horizons $A_1 + A_3$ des mêmes sols, ces rapports ne sont pas non plus significativement différents des précédents; ils varient également de 65 à 70 %.

— Les résultats, concernant les sols calcimorphes et les sols fersiallitiques sans réserve calcique, seront discutés ultérieurement; mais il convient de remarquer, que pour ces derniers, les rapports Fe libre/Fe total sont également du même ordre de grandeur que ceux des sols étudiés ici, bien que les valeurs absolues soient différentes.

— Seuls les sols calcimorphes apparaissent significativement différents, en ce qui concerne ce rapport.

La méthode DEB utilisée ici n'apporte donc pas de renseignements, qui permettent de différencier l'état du fer, à travers les horizons A et (B) de couleurs différentes.



LEGENDE

SOLS FERSIALLITIQVES A RESERVE CALCIQUE

HORIZONS A₁, A₃ —————

HORIZONS (B) - - - - -

SOLS FERSIALLITIQVES SANS RESERVE CALCIQUE

HORIZONS A₁, A₂ - + - + - + - + -

HORIZONS B + + + + + + + + + + +

SOLS CALCIMORPHES SUR CALCAIRES TENDRES

HORIZONS A₁

X : Corrélation significative à 95 %

XX : Corrélation significative à 99 %

Figure 22 – Rapports fer libre / fer total dans les sols fersiallitiques avec ou sans réserve calcique sur calcaires compacts et siliceux et dans les sols calcimorphes sur calcaires tendres .

Les résultats obtenus par SEGALÉN et LAMOUREUX cités ci-dessus, sont, à ce sujet, plus intéressants. Une extraction fractionnée du fer, par des attaques acides successives, leur permet d'obtenir le "fer amorphe". Ils constatent, que celui-ci est absent ou faiblement présent dans les horizons de couleur ocre, et qu'il est plus abondant, dans les horizons (B) rouges. Selon SEGALÉN, c'est le fer amorphe qui donne aux horizons la couleur rouge. Celle-ci masque la couleur originelle des minéraux. Les échantillons dont le fer amorphe a été extrait, restent rouges, si de l'hématite est présente. Ils deviennent gris, si le fer cristallisé est sous forme de goethite.

L'état du fer dans les horizons A_1 et A_3 des sols étudiés ici n'a pas été examiné par cette méthode. Ces horizons posent pourtant un problème important ; il sont, selon les pédologues français, actuellement en voie de brunification. La discussion de ce problème sera entreprise ultérieurement. Examinons d'abord le profil organique.

4.34 - LE PROFIL ORGANIQUE

C'est au niveau du profil organique, que se manifeste l'influence de l'état actuel de la végétation. Ce paragraphe concerne uniquement les sols de la série du Chêne vert. Rappelons que dans celle-ci, les profils ont été prospectés sous trois types de formations végétales : la forêt ou bois de Chêne vert, la garrigue à Chêne Kermès et la pelouse à Brachypode rameux.

Des sols sous forêts de Chêne vert, à ceux sous les pelouses à Brachypode rameux, les modifications, autres que celles concernant le profil organique, sont faibles. On constate une légère modification de la structure des horizons de surface ; les horizons profonds restent inchangés. La couleur brun-foncé des horizons organiques sous forêt s'éclaircit aussi légèrement sous les pelouses. Les modifications les plus importantes concernent le profil organique son étude fait l'objet de ce paragraphe.

L'étude de la matière organique de ces sols a été présentée dans une publication récente (BOTNER, 1970). Les résultats obtenus seront résumés brièvement ici. Il s'agit de mulls calciques ; concernant la morphologie des horizons organiques, deux points doivent être soulignés. D'abord, comme dans tous les sols examinés à travers cette séquence, sur roches-mères calcaires compactes, la matière organique est répartie profondément dans le profil ; sa persistance dans les horizons profonds est due à la présence des ions calcium. Ce point sera davantage explicité dans le chapitre suivant. La morphologie permet de distinguer un horizon A_1 , l'horizon organique principal et un A_3 , qui fait la transition vers les horizons (B), par disparition progressive de la matière organique et apparition de la couleur rouge.

Le deuxième point concerne l'apparition d'horizon A₀, superposé au mull calcaïque. Sous Chêne vert, les conditions de formation de ces horizons sont identiques à celles qui ont été étudiées dans le Vercors. Lorsque la litière est séparée du mull, par le masque de cailloux résiduels, elle se décompose mal et a tendance à former un A₀, toujours peu épais. Il s'agit d'un moder. Précisons de suite que, sous Chêne vert, la présence d'un horizon A₀ est relativement rare. Sa formation est favorisée par deux facteurs : l'absence d'argiles et la sécheresse du milieu d'une part, et d'autre part, le caractère xéromorphe et coriace des feuilles de Chêne vert, dont la décomposition, selon LOSSAINT et RAPP (1969) et RAPP (1970) est lente.

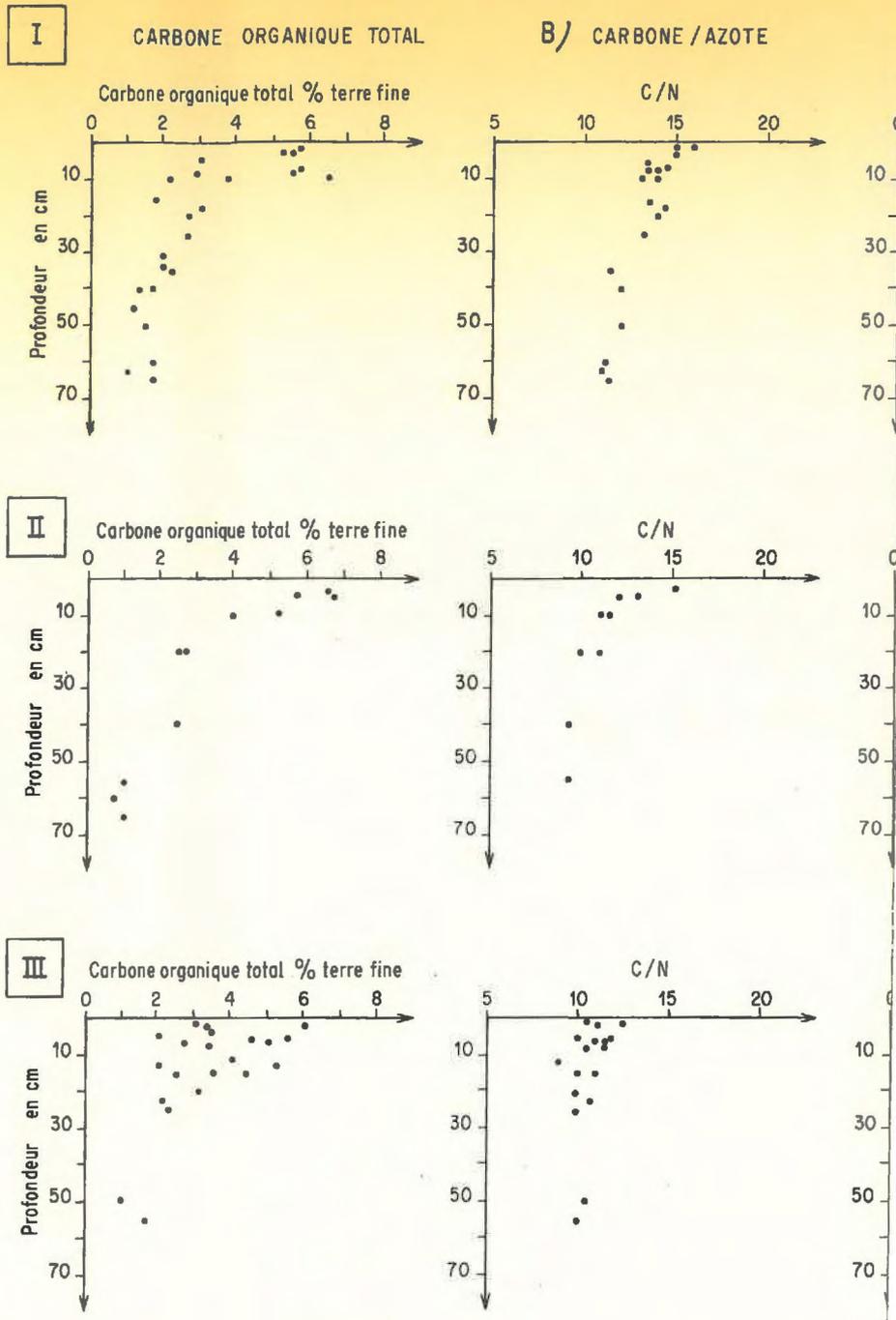
Les valeurs caractéristiques de la matière organique des sols étudiés ici sont représentées dans la figure 23. Comme dans les chapitres précédents, quatre paramètres sont examinés, le carbone organique total, le rapport C/N, les acides humiques en % des acides humiques + acides fulviques et enfin le taux d'extraction.

Examinons d'abord la répartition du carbone organique, à travers les profils, sous les trois types de végétation.

Les profils organiques, sous Chêne vert et sous Chêne Kermès, sont identiques. Ils sont du type forestier. Par rapport aux profils de pelouses, ils sont plus riches en matière organique ; mais cet enrichissement se manifeste exclusivement dans les horizons supérieurs A₁. Les horizons organiques profonds : A₃, restent invariables. Sous forêt, la matière organique est essentiellement issue de la litière. Ceci concerne les valeurs moyennes. En réalité, on constate dans la figure 23, une grande dispersion des points, autant sous forêt que sous pelouse. Certains profils, sous le Brachypode rameux, sont plus riches en matière organique, que d'autres sous Chêne vert. Les zones de dispersion des points se chevauchent partiellement. Ceci est explicable, par l'âge des profils organiques et des groupements végétaux. Il est possible, que sous les forêts de Chêne vert reconstituées, sous les garrigues à Chêne Kermès et sous les pelouses à Brachypode rameux, les profils organiques n'aient pas encore atteint leur état d'équilibre. La végétation est elle-même soumise à des remaniements constants. Par ailleurs, un rôle essentiel est joué par l'hétérogénéité des conditions écologiques. La production végétale et l'incorporation de matière organique dans le sol sont sans doute très variables, suivant les conditions édaphiques et microclimatiques.

Le rapport Carbone/Azote permet également de distinguer les pelouses, des forêts et garrigues. Dans les horizons A₃, ils sont, dans les trois cas, stabilisés au voisinage de 10. En surface, le C/N est plus élevé sous la végétation ligneuse que sous la végétation herbacée.

Concernant l'importance des acides humiques (ac. humiques en % de ac. humiques + ac. fulviques) on constate, comme dans les types de



MULLS CALCIFIQUES (Sols fersiallitiques)

- I - Sous forêts ou bois de Chêne
- II - Sous landes à Chêne Kermès
- III - Sous pelouses à Brachypode rameux

Figure 23 - Valeurs caractéristiques de C et N dans les sols fersiallitiques

sols étudiés précédemment, que les valeurs sont très dispersées et il n'apparaît pas de différenciation significative, sous les trois types de végétation. Une constatation importante est cependant à retenir. Dans les sols formés sous les conditions plus humides du Vercors et sous des types de végétation plus acides, la proportion des acides fulviques augmentait en profondeur, celle des acides humiques diminuait. Cela avait été interprété comme une possibilité d'illuviation d'acides fulviques. Sous les conditions méditerranéennes et dans ces sols dont les pH sont basiques dès les horizons A₁, l'augmentation en profondeur de la proportion des acides fulviques n'apparaît plus.

Comme dans les chapitres précédents, les valeurs du taux d'extraction n'apportent que peu de renseignements. Comme précédemment, elles ont tendance à augmenter avec la profondeur. Ceci est dû à la présence de fractions densimétriques légères, dans les horizons supérieurs.

Les problèmes concernant la matière organique dans ces sols seront approfondis davantage et discutés dans le chapitre suivant.

4.35 - LA QUESTION DE LA BRUNIFICATION ACTUELLE DES SOLS FERRIALITIQUES A RESERVE CALCIQUE DANS LE MIDI DE LA FRANCE

L'objet de ce paragraphe est de discuter d'une éventuelle brunification actuelle des sols ferriallitiques anciens. Ce problème n'est pas résolu. Voici quelques arguments en faveur d'une brunification actuelle. Ils sont cependant insuffisants pour pouvoir conclure d'une manière définitive.

Le premier argument est d'ordre morphologique. Comme nous l'avons vu, ces sols ont en surface un horizon organique profond, subdivisé en A₁ et A₃ ; il est de couleur brune et passe progressivement à la couleur rouge des horizons sous-jacents. La couleur brune est due à l'existence de complexes matière organique - fer - argiles, intimement liés (DUCHAUFOR 1970) ; ils forment le mull-calcaïque. La présence de ces complexes et de ce type de matière organique n'a rien d'exceptionnel et ils existent probablement aussi dans les sols ferriallitiques à réserve calcaïque, non brunifiés. Cependant, ce qui a amené certains pédologues à qualifier les sols rouges du midi de la France de "brunifiés", c'est l'importance de cet horizon à mull et la profondeur qu'il peut atteindre. Une partie ou l'ensemble du fer amorphe des horizons rouges anciens serait donc repris actuellement pour former, dans les horizons supérieurs, un complexe organo-minéral stable. Cependant, il n'a pas été possible, dans l'état actuel de nos recherches, de déceler des formes différentes du fer, dans les horizons brunifiés et dans les horizons restés rouges. C'est un premier objectif qu'il conviendra d'atteindre pour résoudre ce problème.

Le deuxième point concerne la décarbonatation actuelle et la dynamique des bases. LAMOUREUX (1967) constate, dans des sols actuellement en voie de rubéfaction sur calcaires compacts, la formation et la disparition saisonnières de pellicules d'altération, signes d'une décarbonatation intense. Ces pellicules ont été fréquemment observées dans le Vercors ; elles sont moins fréquentes dans le midi de la France et leur évolution saisonnière n'a pas pu être mise en évidence. Par ailleurs, les résultats exposés dans ce chapitre montrent, que les complexes absorbants sont saturés et que les valeurs pH sont élevées à travers tous les horizons A₁, A₃, (B) et B_{Ca}. Nous en avons déduit l'existence d'un certain encombrement des bases dans ces sols. Il semble, que dans le midi de la France, les conditions bioclimatiques actuelles ne soient plus capables d'assurer une élimination énergétique des bases. Cependant, il s'agit là d'une hypothèse. Elle est élaborée, à partir de données provenant d'un nombre suffisamment élevé de profils, mais obtenues à partir d'analyses de séries, relativement rudimentaires. En fait, on connaît très peu de choses, sur la décarbonatation actuelle dans ces sols, son gradient d'intensité à travers les profils et la dynamique des bases. C'est le deuxième point qu'il faudra élucider, avec ces méthodes appropriées, pour résoudre le problème de la brunification.

Le développement de l'horizon brunifié et l'état du complexe absorbant sont en effet liés. La présence d'ions calciques, en grande abondance, protège le complexe organo-minéral, vis-à-vis de la dégradation microbiologique. Elle explique l'importance des horizons bruns, dans les sols étudiés ici. Ceci est illustré par la figure 24. Elle représente l'évolution des horizons bruns et du profil organique, à travers les sols fersiallitiques. Quatre types de sols sont schématisés. Le sol, appelé fersiallitique à réserve calcique brunifié (la case A), est celui qui a été étudié à travers tout ce chapitre. Les sols fersiallitiques sans réserve calcique seront étudiés ultérieurement. Ils sont représentés dans les cases C et D. Précisons simplement ici, qu'ils ne contiennent plus de cailloux calcaires dans les horizons A₂, que ceux-ci sont donc décarbonatés et partiellement désaturés. Ils sont aussi fortement lessivés, appauvris et constitués d'un important squelette de chailles et de silex. Dans la figure, ils sont regroupés en deux types : l'un moins évolué (C) l'autre plus évolué (D). Le sol, appelé "fersiallitique à réserve calcique modal" (représenté dans la case B) est un intermédiaire entre A et C + D. Il occupe dans le karst, des fentes larges ou des poljés ; il contient peu de cailloux calcaires dans les horizons supérieurs et sa réserve calcique présente des surfaces de dissolution relativement moins grandes, que dans le profil du type A de la figure. Les autres caractères n'en sont que la conséquence. Le pH des horizons supérieurs est proche de la neutralité. Ce profil est aussi légèrement lessivé. On a donc, à travers les horizons supérieurs de ces quatre profils, une diminution progressive de la réserve calcique, une décarbonatation croissante, une diminution du degré de sur-saturation, puis dans les profils C et D une désaturation et enfin, un lessivage de plus en plus important des argiles.

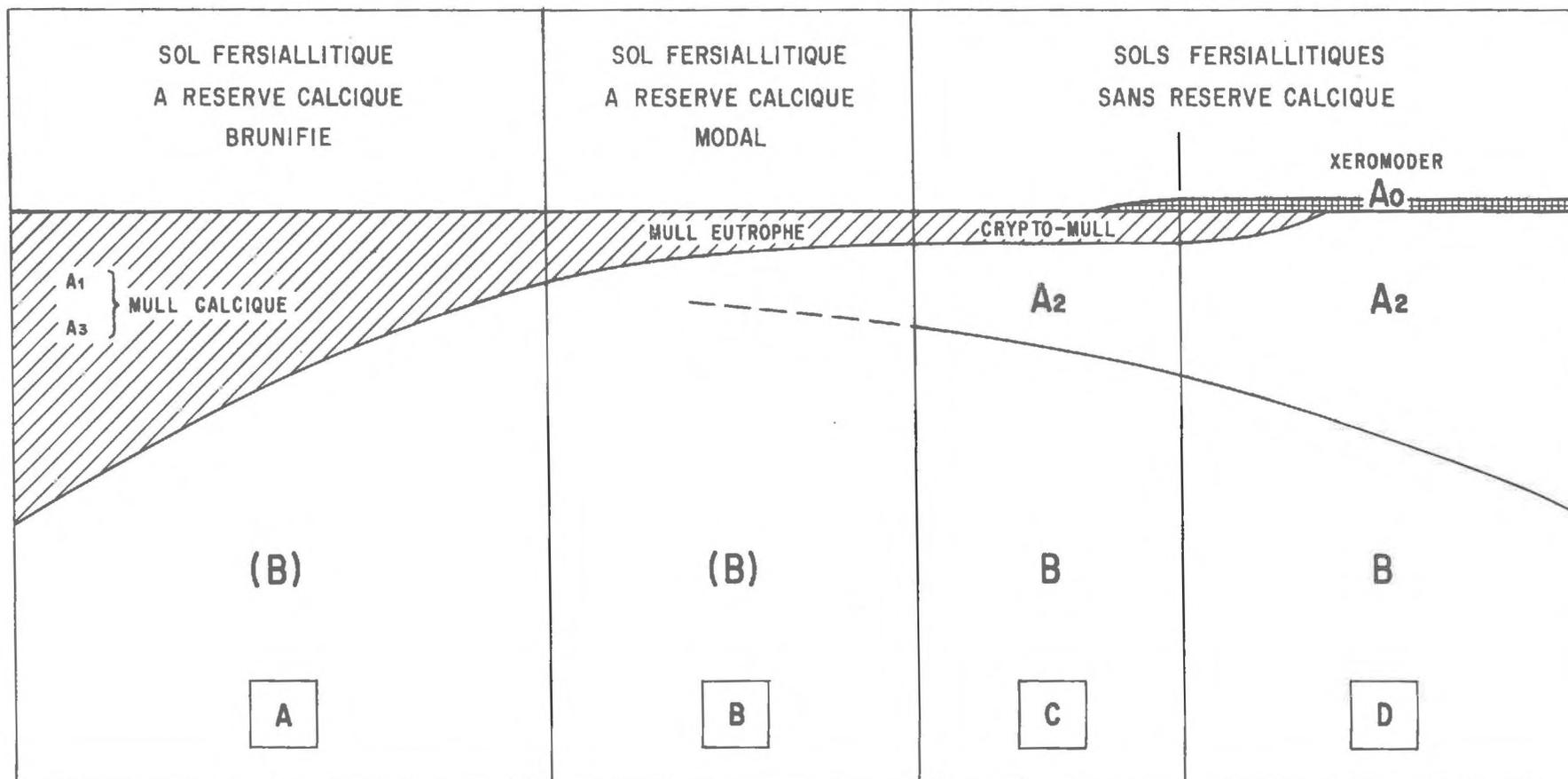


Figure 24 – Evolution du profil organique dans les sols ferralsolitiques.

On constate, dans la figure 24, que des sols les moins évolués aux plus évolués, l'horizon brun est de plus en plus mince. Il est profond dans les sols fersiallitiques à réserve calcique, riches en cailloux calcaires, souvent calcaires dans la terre fine, et toujours à pH basique. Il s'agit alors d'un mull calcique, dont la quantité de matière organique décroît lentement avec la profondeur (A_1 et A_3). A travers les profils B, C et D, ce mull devient de plus en plus superficiel ; dans les horizons lessivés, nous l'avons appelé (BOTTNER, 1970) cryptomull. Dans les sols les plus évolués, il disparaît ; seul un léger xéromoder subsiste.

En définitive, la reconnaissance d'une brunification actuelle des sols fersiallitiques à réserve calcique n'est justifiée, dans l'état actuel de nos connaissances, que par l'existence d'un horizon organique profond de couleur brune ; celui-ci est dû à des complexes matière organique-fer-argiles en milieu très calcique. La stabilité de ceux-ci, dans les horizons A_1 et A_3 , est soumise à deux conditions : le maintien d'argiles, dans les horizons supérieurs du sol ancien et la présence d'ions calciques, en quantité suffisante, pour protéger les complexes de la biodégradation rapide. La présence de fer sous forme "libre" ou "amorphe" a été assurée par les paléopédogénèses. Sur ces surfaces karstiques qui ont été étudiées dans le midi de la France, la pédogénèse actuelle serait donc celle qui correspond à la formation de sols bruns calcaires ou de sols bruns très calciques.

D'autres arguments sont donnés en faveur d'une brunification actuelle, dans le midi de la France. L'un est d'ordre géomorphologique : les matériaux, mis en place sur les terrasses alluviales würmiennes, sont peu altérés. Il faut, bien sûr, en exclure les éléments issus de pédogénèses ante-würm et simplement remaniés par la gélifraction, la solifluxion ou la cryoturbation. Sur les matériaux silicatés, se sont développés depuis le Würm des sols bruns ; sur du matériel calcaire, se sont formés des sols bruns calcaires. Selon RUTTEN et al. (1963), on y remarque une légère migration des carbonates, avec parfois ébauche, entre 40 et 50 cm de profondeur, d'une croûte. Ces matériaux ne sont pas rubéfiés.

Un autre argument avancé est d'ordre climatologique. LAMOUREUX (1967) a déterminé, au Liban, les aires climatiques de formation actuelle de sols rouges. Elles sont définies par les paramètres suivants :

- T : température moyenne annuelle 10 à 22°
- P : précipitation moyenne annuelle 4-600 à 1400 mm
- D : eau de drainage = P - ETP (Thorntwaite) = 200 à 1000
- E : = D x T supérieur à 5000

Les conditions climatiques, du midi de la France, ne correspondent pas aux aires délimitées par LAMOUREUX. La température moyenne annuelle est de 14,6 et les précipitations sont de 752 mm. Mais $D = P - ETP =$

752 - 773 donne ici des valeurs négatives. En considérant $D = P - ETR$ (évapotranspiration réelle) = 752 - 552 = 200, E dans ce dernier cas est égal à 2920. (Les valeurs de ETP et ETR de Thornthwaite données : ici ont été calculées pour la station de Montpellier - Bel-Air par DAGET, communication personnelle). D'après les données exposées ici, il semble donc, que les Garrigues montpelliéraines ne soient pas, par leurs conditions bioclimatiques, dans l'aire de rubéfaction actuelle définie par LAMOUROUX. La température moyenne annuelle, supérieure à 10°C serait favorable, bien qu'elle ne soit pas à son optimum ; mais D = eau de drainage, est trop faible. Qu'en est-il des Monts du Vaucluse ? Les précipitations sont plus favorables, mais les températures moyennes annuelles sont inférieures ou au voisinage de 10°C.

Avant de clore ce paragraphe, comparons maintenant les sols fersiallitiques, "brunifiés" étudiés ici aux sols bruns calciques inventoriés dans le Vercors. Ils sont différents par un certain nombre de caractères.

Le plus évident concerne la dissolution des carbonates et l'élimination des ions calcium. L'essentiel à ce sujet a déjà été exposé précédemment. Le pH (H_2O) est dans les horizons A_1 des sols bruns calciques du Vercors proche de la neutralité ou faiblement acide ; dans ces mêmes horizons, les pH sont dans les sols fersiallitiques de 7,5 à 7,7.

Une autre différence, très évidente également, concerne la matière organique. Dans la comparaison des profils organiques, deux points sont à mentionner. Le premier concerne les horizons organiques profonds : les horizons (B) des sols bruns calciques de la hêtraie mésophile, et les A_3 des sols fersiallitiques à réserve calcique. Les deux types d'horizons ne sont pas significativement différents, quant à leur teneur en carbone organique total. Par contre, la différence est probablement significative, en ce qui concerne les quantités de matière organique dans les horizons A_1 . En surface, les sols bruns calciques sous Hêtre sont plus organiques que ceux sous Chêne vert et la différence apparaît également, quand on compare les profils sous les deux types de pelouses. Il y a également des différences, dans les autres valeurs caractéristiques de la matière organique, telles que le C/N et les rapports acides humiques/acides fulviques. Ces questions seront traitées dans le chapitre suivant, concernant l'extraction fractionnée des composés humiques.

Le troisième caractère distinctif est moins évident. Il concerne le rapport fer libre/fer total. Dans les sols bruns calciques de la hêtraie mésophile (figure 12 page 71), il varie entre 60 et 90 % en A_1 et 50 et 80 % en (B). Dans les sols du midi de la France, ce rapport va de 65 à 70 % (figure 22, page 120), dans les horizons A_1 et A_3 . Si le fer semble, dans les horizons A_1 des sols du Vercors,

plus libre que dans ceux du midi de la France, cette différence n'est pas significative. Dans tous les sols examinés dans cette séquence, le rapport fer libre/fer total nous a apporté peu de renseignements.

La quatrième différence observée est plus instructive ; elle concerne les rapports Aluminium libre/ Aluminium total. Dans les sols du midi de la France, ils n'ont pas été présentés, puisqu'ils sont très faibles : de l'ordre de 5 %. C'est un caractère constant dans les sols méditerranéens, que l'on observe même dans des profils évolués, tels que les sols rouges lessivés. Par contre, dans les horizons A₁ des sols bruns calciques, sous la hêtraie mésophile, le rapport varie autour de 10. Il apparaît aussi une différence nette, dans la minéralogie des argiles. Son étude sera abordée ultérieurement.

Enfin une dernière comparaison s'impose : celle entre les sols fersiallitiques sous les pelouses dégradées, à *Brachypode* rameux et dont le profil organique est généralement appauvri en surface et les sols isohumiques. D'après RUELLAN (1966, 1970), dans les sols bruns et les sols châtaîns isohumiques du Maroc, l'isohumisme serait, pour une part, le résultat, de l'appauvrissement superficiel du profil organique d'anciens sols de forêts qui, après dégradation, sont actuellement remplacés par des steppes. Il y a cependant des différences fondamentales, entre les sols bruns isohumiques et les sols des pelouses de dégradation, qui ont été étudiés dans ce chapitre. Si, dans les deux cas, le profil organique est profond et à décroissance lente, dans le midi de la France, les teneurs en matière organique sont plus importantes et les C/N sont plus élevés (10 à 12 contre 10 à 8), que dans les sols de steppes nord-africaines.

4.4 - CONCLUSION

Les points les plus importants, dégagés de ce chapitre, ont été rappelés dans le paragraphe précédent, concernant la brunification des sols rouges et ils ne seront pas repris dans cette conclusion.

Les données exposées concernaient essentiellement les sols étudiés sous la série du Chêne vert. Qu'en est-il de ceux examinés dans les Monts du Vaucluse et sur le Plateau de St Christol sous la série normale du Chêne pubescent ?

Les différences climatiques entre les deux régions ont donné origine à des types de végétation différents : la forêt de Chêne pubescent et des pelouses de dégradation à *Brachypodium pinnatum*, *Bromus erectus*, *Festuca glauca* et *Koeleria vallesiaca*, d'une part et des forêts de Chêne vert, ainsi que des pelouses de dégradation à *Brachypodium ramosum* et à *Asphodelus cerasifer*, d'autre part. Il n'en est pas de même, en ce qui concerne les sols ; le dépouillement des résultats d'analyses n'a pas permis d'établir de différence significative entre

les deux régions. Les caractères morphologiques sont comparables également. Ces sols résultent essentiellement de palopédogénèses et la pédogénèse actuelle est lente. Les différences bioclimatiques, sous la série du Chêne vert et sous la série du Chêne pubescent, ne sont pas assez importantes, pour changer les caractères hérités des paléosols.

Les sols de la série du Chêne vert sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote. Les sols de la série du Chêne pubescent sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote.

Les sols de la série du Chêne vert sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote. Les sols de la série du Chêne pubescent sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote.

CONCLUSION

Les sols de la série du Chêne vert sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote.

Les sols de la série du Chêne pubescent sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote.

Les sols de la série du Chêne vert sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote. Les sols de la série du Chêne pubescent sont caractérisés par une structure en blocs, une couleur brune foncée, une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en azote.

CHAPITRE V

5. - ETUDE PLUS APPROFONDIE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS DEVELOPPES SUR ROCHES-MERES CALCAIRES DURES ET PURES : SEPARATION DENSIMETRIQUE EXTRACTION FRACTIONNEE DES COMPOSES HUMIQUES CONTROLEE PAR ELECTROPHORESE

La matière organique des sols de la séquence sur roches-mères calcaires compactes a déjà été étudiée précédemment aux chapitres I, II et IV. Les résultats étaient obtenus, à partir d'analyses de séries, effectuées sur un nombre élevé d'échantillons. Quatre valeurs caractéristiques de la matière organique ont été présentées dans les figures et discutées. Ce sont : le profil organique, le rapport Carbone/Azote, les acides humiques exprimés en % de $\text{ac. humiques} + \text{ac. fulviques}$, et le taux d'extraction. Ces données concernaient la matière organique globale, c'est-à-dire la fraction légère peu décomposée + l'humus. L'objet de ce chapitre est d'étudier la matière organique, par des méthodes plus approfondies : séparation densimétrique des fractions lourdes et légères, extraction fractionnée des composés humiques et séparation des acides humiques immobiles et mobiles, par électrophorèse. La méthode utilisée est celle de DUCHAUFOR-JACQUIN (1963, 1966). Elle a été appliquée à un nombre restreint d'échantillons, représentatifs de l'ensemble des sols examinés.

Ce chapitre est constitué de quatre parties. La première est un bref rappel des données exposées précédemment, sur la matière organique. La deuxième concerne la séparation densimétrique. Dans la troisième partie, sont présentés les résultats de l'extraction fractionnée des composés humiques. Enfin la dernière traite de l'électrophorèse des acides humiques.

5.1 - RAPPEL DES DONNEES EXPOSEES PRECEDEMMENT CONCERNANT LA MATIERE ORGANIQUE

Ces données sont synthétisées dans les figures 25, 26, 27 et 28). Elles correspondent à chacune des quatre valeurs caractéristiques de la matière organique, exprimées en fonction de la profondeur. Elles concernent les principaux types de sols, rencontrés sur roches-mères calcaires compactes, dans cette séquence. Chaque type de sol porte un numéro. Celui-ci est expliqué dans la légende des figures, page 133 . Certains types de sols sont étudiés sous forêts et sous pelouses. Ils sont alors matérialisés par un trait continu pour les premiers, et un trait discontinu pour les seconds. Chaque trait correspond à la moyenne de l'ensemble des profils examinés. Rappelons, pour être complet, que les composés humiques sont extraits, en une seule extraction, au pyrophosphate de sodium à 0,1M. Voici quelques remarques importantes, concernant ces quatre figures.

5.11 - CARACTERES CONSTANTS DES HORIZONS A₀ *)

Les horizons A₀ sont représentés par le signe □ . Il s'agit fréquemment de moders et plus rarement de mors. Les uns proviennent de sols sous la pessière (2), les autres de sols sous la hêtraie méso-phile (4). Les valeurs caractéristiques des A₀, sous chacune de ces deux séries de végétation, ne sont probablement pas significativement différentes, puisque la dispersion des points pour chaque valeur est grande. De l'étage subalpin au montagnard, ces horizons sont de plus en plus rares, de moins en moins épais, mais leurs caractères chimiques ne varient pas. Les teneurs en carbone total sont élevées, les rapports C/N également. L'important taux d'acides humiques (figure 27) est probablement dû à l'entraînement d'acides fulviques, vers les horizons minéraux sous-jacents. Enfin, la grande quantité de matière organique, non extraite au pyrophosphate (figure 28), est constituée de matière fraîche non décomposée.

5.12 - ORIGINALITE DES MULLS-MODERS

Les mulls-moders des sols litho-calciques, sous les pelouses alpines et pseudoalpines (1), forment un type d'humus original, différent des moders précédents et des mulls étudiés ci-après. Cela sera également confirmé, par d'autres données, présentées dans ce chapitre. Le profil organique est riche, à travers tous les horizons. Le C/N très bas, inférieur à 10, de ces sols a déjà été mis en évidence, au chapitre I. Trois raisons permettent de l'expliquer. D'une part, la végétation basiphile à neutrophile accélère la décomposition de la matière organique. Par ailleurs, la biodégradation est favorisée par l'effet rhizosphère et probablement aussi par l'absence, ou la présence en quantité faible, d'argiles.

5.13 - LES MULLS RICHES EN MATIERE ORGANIQUE

Tous les autres types d'humus, représentés dans les figures, sont des mulls, développés sur les argiles de décarbonatation, ou les apports allochtones. Leur complexe absorbant est, soit proche de la saturation, soit plus généralement saturé. Il y a lieu, de distinguer les horizons organiques profonds et les horizons organiques superficiels. Les premiers correspondent aux horizons A₃ ou (B), les seconds, aux horizons A₁.

Dans l'étude morphologique des sols du Vercors, deux types de mulls ont été distingués : les mulls appelés normaux ou modaux et les mulls, qualifiés de riches en matière organique, parce qu'ils étaient de couleur très foncée et que celle-ci se prolongeait profondément

*) Concernant la signification de A₀, voir note en bas de la page 30.

| TYPES DE SOL | ETAGE OU SERIE DE VEGETATION | FORMATION VEGETALE | LEGENDE |
|---|--|--------------------|---------|
| SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MULL MODER | ETAGE ALPIN OU PSEUDOALPIN | PELOUSES | ① ----- |
| SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MODER | SERIE DE L'EPICEA | FORETS | ② _____ |
| SOLS BRUNS CALCIQUES HUMIFERES (à MULL riche en M.O.) Sols humiques carbonatés | | | ③ _____ |
| SOLS BRUNS CALCIQUES HUMIFERES (à HUMUS BRUT) Sols humiques carbonatés | SERIE DE LA HETRAIE MESOPHILE | FORETS | ④ _____ |
| SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX | | | ⑤ _____ |
| | | PELOUSES | ⑤ ----- |
| SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE "BRUNIFIES" | SERIE NORMALE DU CHENE PUBESCENT | FORETS | ⑥ _____ |
| | | PELOUSES | ⑥ ----- |
| | SERIE DU CHENE VERT | FORETS | ⑦ _____ |
| | | PELOUSES | ⑦ ----- |

LEGENDE des figures 25,26,27 et 28. Désignation des types de sols, des étages et séries de végétation et des formations végétales.

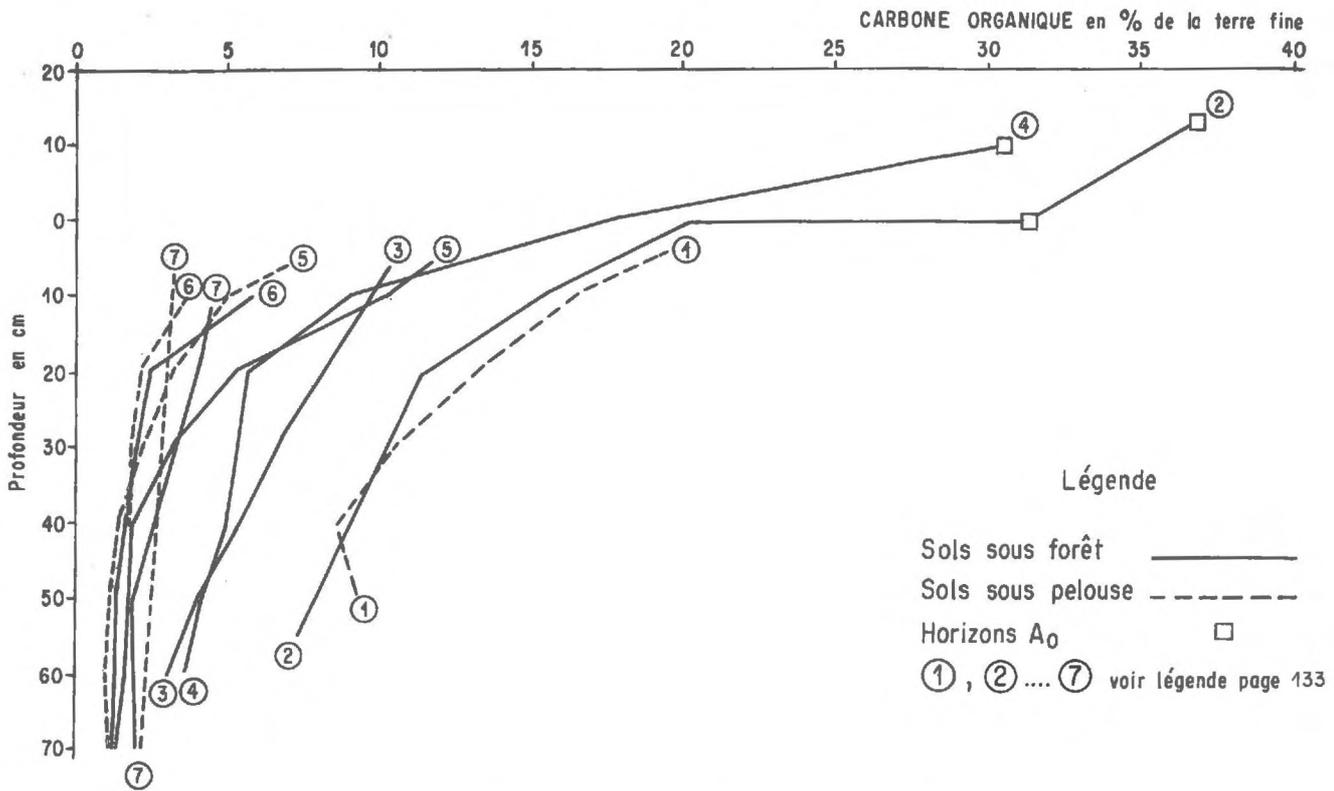


Figure 25 - Profils organiques des sols développés sur roches-mères calcaires compactes

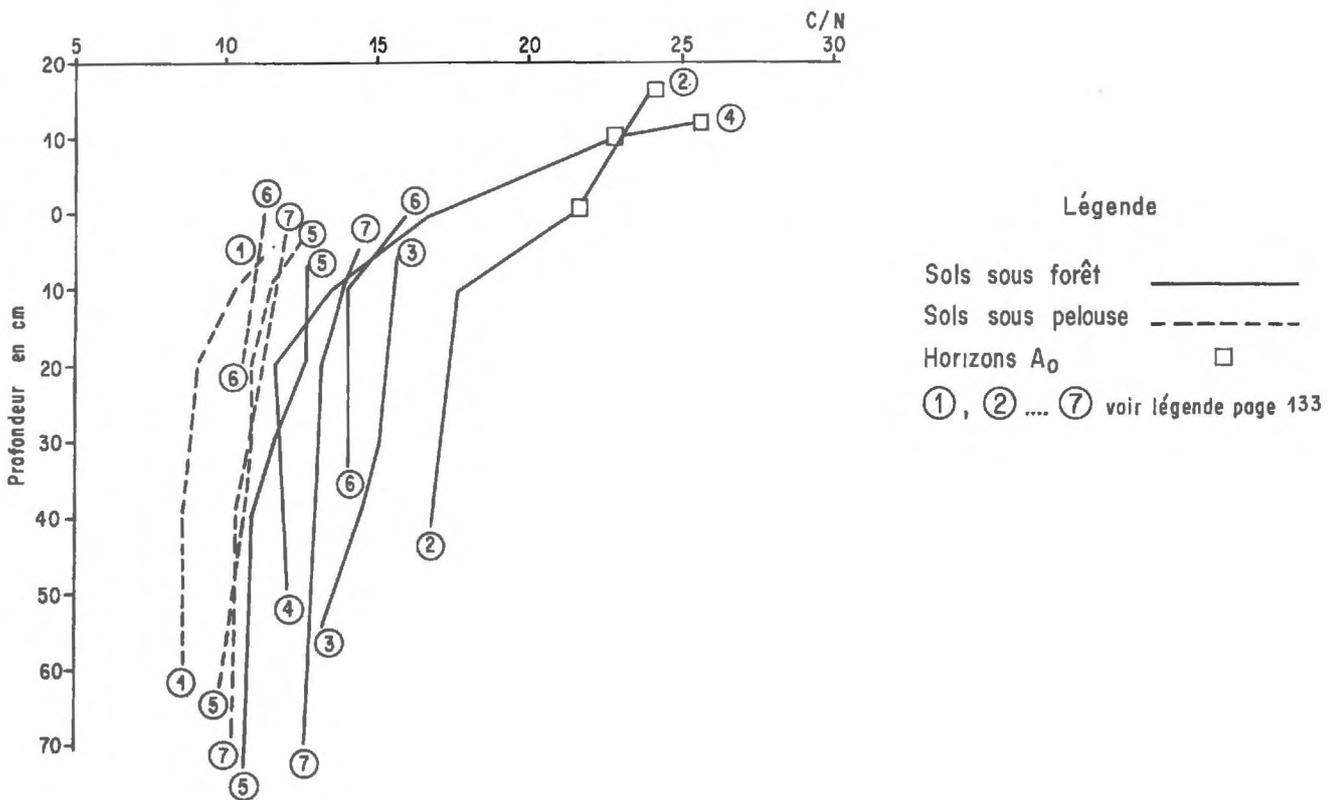


Figure 26 - Rapports Carbone / Azote dans les sols développés sur roches-mères calcaires compactes

dans le profil. Ils sont fréquents dans les horizons A_1 des sols litho-calciques à moder (2), des sols humiques carbonatés (3 et 4) et des sols bruns calciques humifères (également 3 et 4). On les rencontre, sous la pessière (2 et 3) et sous la hêtraie mésophile (4). Ils sont absents des étages méditerranéens. Leur présence est liée à deux conditions essentielles. L'une est d'ordre bioclimatique : ces mulls riches en matière organique se forment de préférence, sous l'étage subalpin et à la partie supérieure du montagnard, sous les résineux, où la matière organique se décompose plus lentement et les composés humiques se biodégradent plus difficilement. Dans d'autres cas, et en particulier sous la hêtraie, ces mulls se forment dans des sols très caillouteux. Il s'agit alors, de conditions géomorphologiques particulières : par manque d'argile, la matière organique tend à s'accumuler. Le stade encore plus défavorable correspond à l'accumulation d'un A_0 au-dessus du mull. Ces types d'humus se distinguent des mulls normaux par leurs caractères chimiques. D'une part, comme le montre la figure 25 (2,3,4), ils sont plus organiques, autant dans les horizons de surface, que dans les horizons profonds. Par ailleurs, leur C/N reste relativement élevé, à des profondeurs plus grandes, que dans les mulls modaux (2, 3 et 4 de la figure 26). Les composés humiques sont plus difficilement minéralisés.

5.14 - DEUX TYPES DE MULLS MODAUX

Dans les mulls modaux, considérons d'abord ceux qui sont sous végétation forestière (trait continu). Deux types se distinguent facilement : ceux qui sont sous la hêtraie mésophile (5) et ceux qui sont sous les séries subméditerranéenne (Chêne pubescent, 6) et méditerranéenne (Chêne vert, 7). Ils ont en commun un profil organique profond, stabilisé aux alentours de 2 % de carbone organique. Ils diffèrent par le carbone des horizons de surface, plus élevé en (5) qu'en (6) et (7) (figure 25). La pauvreté en matière organique des sols soumis aux conditions méditerranéennes est bien connue. Elle est probablement due à une moindre production végétale. La stabilisation du profil organique profond, à une valeur relativement élevée de 2 % de carbone, a été expliquée dans le chapitre précédent. Par rapport à celui des sols désaturés ou lessivés, le profil organique est en effet ici réparti profondément dans le sol (BOTNER, 1970). Cela est dû à l'effet de protection des argiles et du calcium sur la matière organique, dans les complexes organo-minéraux stables des mulls calci-

Considérons maintenant les rapports Carbone/Azote, dans ces mulls modaux (figure 26). Dans les sols soumis aux conditions méditerranéennes (6 et 7), ceux-ci sont plus élevés que dans les sols sous la hêtraie (5). Ceci semble paradoxal, puisque dans les premiers, la végétation est moins acide, le sol plus basique et le carbone total moins élevé. Dans les sols méditerranéens, la matière organique fraîche se décompose plus lentement que dans les sols bruns calciques sous la hêtraie. Ceci sera confirmé plus loin dans ce chapitre. Cette

décomposition plus lente est due, d'une part, au caractère xéromorphe des feuilles de Chêne vert et, d'autre part, à la sécheresse estivale du milieu. On assiste là, à une accumulation de matière organique non décomposée entre les grumeaux du mull. Dans les cas extrêmes, elle aboutit parfois à la formation du xéromoder, morphologiquement reconnaissable. En ce qui concerne donc les rapports C/N des sols sous forêts, les valeurs les plus faibles correspondent aux sols bruns calciques sous hêtraie, les valeurs les plus élevées, aux mulls riches en matière organique dans les sols sous résineux. Une tendance vers des valeurs également plus élevées que sous la hêtraie est due au caractère xérophile du Chêne vert et à la sécheresse du climat méditerranéen.

5.15 - MATIERE ORGANIQUE ET DEGRADATION DE LA VEGETATION

Dans ces sols à mulls modaux la prospection a été réalisée sous forêts et sous pelouses de dégradation. Là aussi, les sols soumis aux conditions méditerranéennes se comportent différemment de ceux soumis aux conditions montagnardes de la hêtraie mesophile. Comme nous l'avons montré au chapitre II, sous la hêtraie (5 de la figure 25), la dégradation anthropique amène un appauvrissement du profil organique superficiel. C'est un cas très souvent vérifié et ces différences sont significatives. Le profil organique profond, par contre, reste inchangé. Il est également stabilisé autour de 2 % de carbone organique. Sous la série du Chêne vert, ce même schéma est vérifié en ce qui concerne les valeurs moyennes (figure 25, 6 et 7). Mais il y a de nombreuses exceptions. Certains profils de pelouses à *Brachypode* rameux sont plus riches en carbone organique, que d'autres sous forêt de Chêne-vert. Les différences entre profils organiques, sous pelouses, et sous forêts méditerranéennes observées dans la figure 25, ne sont probablement pas significatives. Dans le chapitre précédent, l'hypothèse suivante a été proposée : dans les deux cas, les profils organiques ne sont pas encore en équilibre avec les types de végétation dégradée ou reconstituée.

Toujours concernant la dégradation, on constate que la végétation forestière ou herbacée se reflète par contre, d'une manière probablement significative, dans les rapports C/N, comme en témoigne la figure 26. La différence apparaît, sous tous les étages bioclimatiques. Il sera démontré dans ce chapitre, que la matière organique fraîche : la fraction densimétrique légère, subsiste en faible quantité, dans les sols sous pelouses, même sous les conditions méditerranéennes.

5.16 - ILLUVIATION DE COMPOSES HUMIQUES, A POIDS MOLECULAIRE FAIBLE

Très peu de conclusions ont été dégagées de l'examen des rapports acides humiques en % des acides humiques + acides fulviques, représentés dans la figure 27. En effet, comme il a été montré dans les chapitres antérieurs, les valeurs correspondant à un même type de sol,

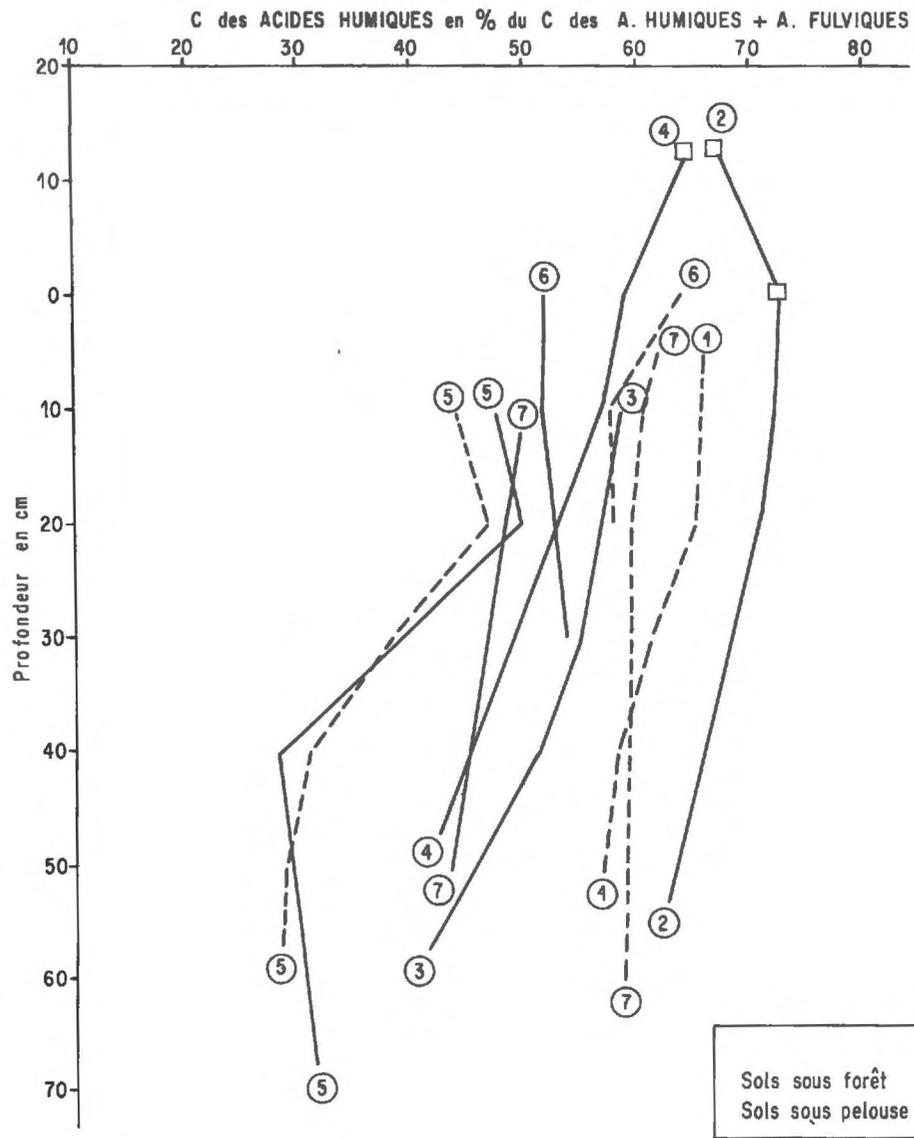


Figure 27 - Acides humiques - Acides fulviques dans les sols développés sur roches-mères calcaires compactes (Acides humiques en % de Ac. hum. + Ac. Fulv.).

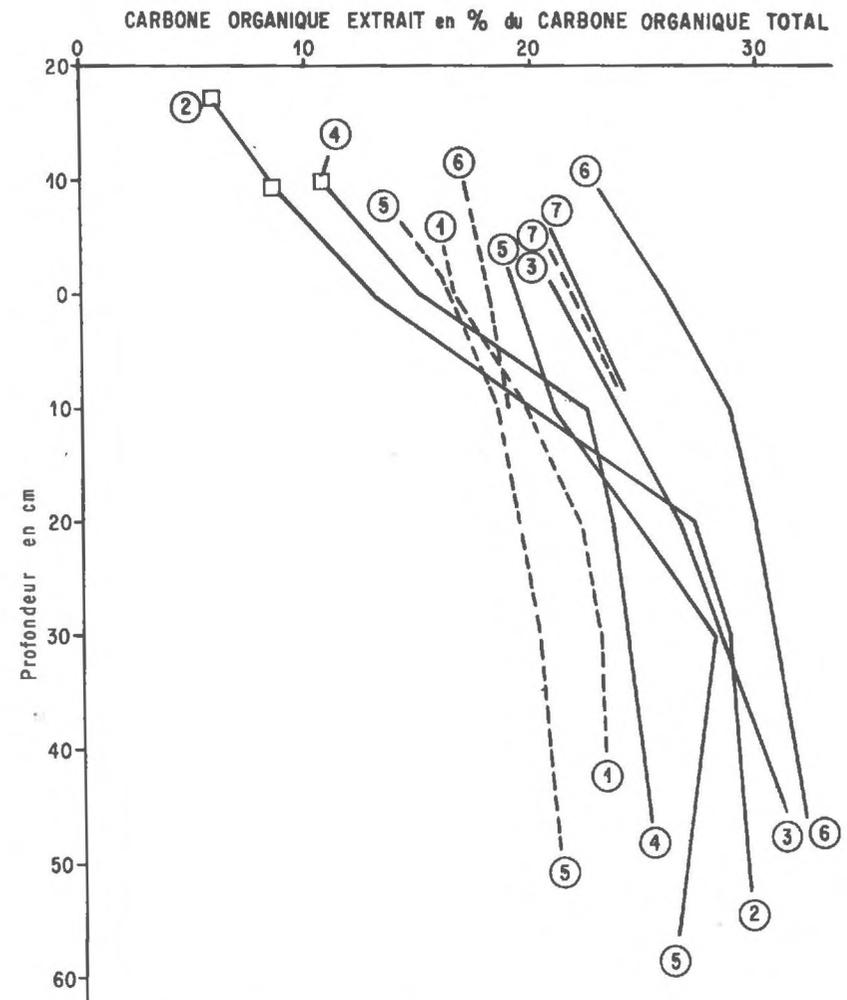


Figure 28 - Taux d'extraction dans les sols développés sur roches-mères calcaires compactes.

sont très dispersées. L'interprétation de la comparaison des moyennes demande beaucoup de précautions. Cependant, une observation intéressante a été faite, à ce sujet. Elle concerne la variation de la proportion des acides humiques, exprimée en % des ac. humiques + ac. ful., en fonction de la profondeur. Dans certains types de sols, elle diminue et celles des acides fulviques augmente. Cette matière organique des horizons profonds a une double origine : elle provient, d'une part, des racines ; cependant l'hypothèse d'une illuviation de produits organiques à faible poids moléculaire et qui forment en (B) des composés peu polymérisés est également proposée pour un certain nombre de types de sols. A ce sujet, l'explication de la figure 27 serait alors la suivante.

On constate, que dans les lithosols humo-calciques, en particulier ceux à moder, sous la pessière (2), la variation de la proportion des acides humiques est faible, à travers les horizons A₀ et A₁. Par ailleurs, le rapport ac. hum., en % de ac. hum. + ac. ful., est élevé à travers tous ces horizons. Ces sols sont très percolés, en particulier les A₁. Il est probable, que les acides fulviques sont éliminés du profil, en même temps que le calcium et les composés du fer, dont ces sols sont très appauvris, comme il a été montré au chapitre I.

Dans les sols bruns calciques, sous la hêtraie mésophile (5), ces mêmes acides seraient fixés dans les horizons (B), à la fois argileux et fortement calciques ou calcaires. La percolation est aussi moins importante et il n'y a plus d'horizons A₀. On observe en effet, dans ces sols, un ventre d'acides fulviques en (B) (5 de la figure 27).

Enfin, le troisième cas concerne les sols, sous les conditions méditerranéennes : 6 et 7. Ces profils sont fortement calciques, dès l'horizon de surface ; la végétation est moins acide, l'eau qui traverse le profil est peut-être aussi moins abondante. A travers ces sols, les variations de la proportion des acides fulviques ou humiques reste faible. L'illuviation n'aurait pas lieu.

Il s'agit là, bien sûr, d'une interprétation ; elle est fondée sur deux hypothèses. L'une suppose, que le ventre d'acides fulviques est dû à une illuviation d'acides organiques, à poids moléculaire faible, qui migrent sous forme de sels ou de complexes du calcium ou du fer. Ils restent peu polymérisés dans les horizons illuviaux. La deuxième hypothèse admet, que les droites 5 de la figure 27 sont significativement différentes de 2 et de 6 + 7. Elle suppose aussi, que l'augmentation de la proportion des acides fulviques, en fonction de la profondeur, est significative pour 5. Ceci est difficilement vérifiable pour les raisons qui ont été exposées au début de ce paragraphe.

5.17 - LES TAUX D'EXTRACTION

C'est pour ces mêmes raisons, que les taux d'extraction, exprimés dans la figure 28, sont difficiles à interpréter. Les valeurs, correspondant à un même type de sol, sont très dispersées. On constate une augmentation du taux, en fonction de la profondeur. Elle est vérifiée dans tous les types de sols. Une explication est possible : la matière organique fraîche est plus abondante, en surface qu'en profondeur et, comme le montrent les horizons A₀, celle-ci a un taux d'extraction faible. Les taux plus élevés, dans les sols méditerranéens (6 et 7), que dans les autres types, seront discutés plus loin dans ce chapitre.

En définitive, ces données ont permis de mettre en évidence un certain nombre de faits, dont quelques uns sont facilement explicables, d'autres demandent des recherches plus approfondies. Elles ont aussi permis, de choisir un nombre restreint d'échantillons, sur lesquels une étude plus détaillée a été réalisée. Les résultats de celle-ci sont exposés dans la suite de ce chapitre.

5.2 - CHOIX DU MATERIEL D'ETUDE

Un, généralement deux, ou trois profils caractéristiques de chacun des plus importants types de sols ont été sélectionnés. Ils sont représentés dans la figure 29 à la colonne A. La colonne B correspond aux étages ou aux séries de végétation, sous lesquels ils ont été prélevés. Certains des profils, d'un même type de sol, ont été choisis sous forêts, sous pelouses ou sous les deux types de formations végétales. Celles-ci sont représentées dans la colonne C. En D, sont indiqués les types d'horizon, dans lesquels la matière organique a été étudiée ; il s'agit d'horizons A₀, A₁, A₀/A₁ ou (B). Dans cette figure et dans toutes les autres de ce chapitre, trois types de trames sont utilisés. Le gris foncé correspond aux horizons A₀, le blanc aux horizons A₁ ou A₀/A₁ et enfin, le gris moyen aux (B). La colonne E correspond aux types de matière organique : moder, xéromoder, mull-moder, ou mull riche en matière organique et modal. Enfin, en G sont indiqués les numéros des profils utilisés. Parmi eux, V signifie Vercors, LV : Monts du Vaucluse, L : Languedoc. Les horizons, appartenant à un même profil, sont réunis par un trait et une flèche entre F et G. La colonne F numérotée de 1 à 16 sera utilisée, dans la discussion des résultats et dans les figures ultérieures, pour repérer plus facilement les types d'horizons. Elle est nécessaire, dans ces graphiques très chargés.

Le choix des types de sols, d'horizons et de formations végétales mérite quelques explications.

- Dans les sols litho-calciques à mull-moder, deux types d'horizons ont été étudiés. Les A₀/A₁ (2 colonne F de la figure 29) sont les

plus répandus ; ce sont ceux, dont il était question au chapitre I. Les horizons A₀ sont rares sur ces types de sols et peu épais : 2 à 3 cm ; ils recouvrent les A₀/A₁. Ils ont cependant été étudiés, en vue d'une comparaison avec les humus bruts sous forêts. Ils se trouvent, en 1 de la colonne F, fig. 29.

- Dans les sols bruns calciques la matière organique est étudiée dans les horizons A₁ mais aussi dans les horizons (F) (6 et 10 de la colonne F). Le but est de vérifier l'hypothèse d'une illuviation de composés humiques, dont il était question précédemment.

- Les horizons A₀ sous Chêne vert sont rares. Il s'agit de xéromoders. Cependant, un échantillon de ce type d'humus a été joint aux profils sélectionnés, en vue d'une comparaison avec les autres types d'humus brut. Il recouvre un sol fersiallitique à réserve calcique brunifié (14). Précisons, que cet A₀ est peu épais (0-5cm), mélangé à des cailloux calcaires, son recouvrement est incomplet et son complexe absorbant, à l'inverse des autres moders, est saturé.

- Enfin, la matière organique a été étudiée sous forêts, mais aussi sous pelouses, dans la plupart des types de sols examinés. Le choix des échantillons est de ce fait assez complet.

5.3 - LA SEPARATION DENSIMETRIQUE

5.31 - LA METHODE UTILISEE - EXPRESSION DES RESULTATS

La séparation a été effectuée, d'après une méthode proposée par MONNIER et al. (1962), puis reprise par DUCHAUFOR et JACQUIN (1963 et 1966). A la suite des travaux de DUTHION et CRETIEN (1966), la densité de 1,75 a été adoptée ici. DUCHAUFOR et JACQUIN (communication verbale) utilisent une densité de 1,80. Celle-ci est obtenue par un mélange bromoforme-éthanol. Sur un même échantillon, la séparation est effectuée par centrifugation, trois fois de suite. Puis, les fractions légères surnageantes et lourdes (le culot de centrifugation) sont lavées énergiquement à l'éthanol, afin d'éliminer tout le bromoforme. Les deux fractions sont ensuite séchées sous vide, à 70°C. Le carbone est dosé par la méthode ANNE. Le dosage est effectué sur l'échantillon global, avant la séparation densimétrique. Il donne le carbone organique total. Il est ensuite réalisé, sur les fractions légère et lourde. Dans la figure 29, à la colonne H, T correspond au carbone organique total, exprimé en % de la terre fine ; l correspond au carbone organique en grammes, contenu dans 100 gr de fraction légère, c'est la teneur en carbone de la fraction légère, exprimée en % du poids de la fraction. De même, L correspond en grammes au carbone contenu dans 100 grammes de fraction lourde ; c'est donc aussi la teneur en carbone de la fraction lourde, exprimée en % de son poids total. Dans la figure 29, à la colonne I, sont représentés les pourcentages du carbone des fractions légères (l) et lourdes (L) par rapport au carbone

organique total (T). Lorsque le trait est continu, il s'agit de sols sous forêts ; lorsqu'il est discontinu, il s'agit de sols sous pelouses de dégradation. L est à droite du trait et l à gauche.

5.32 - INTERPRETATION DES RESULTATS

L'examen des valeurs de T (colonne H) n'apporte pas de données nouvelles. Il faut cependant remarquer à ce sujet, que le xéromoder du sol fersiallitique, sous Chêne vert (14 en F) contient, par rapport aux autres humus bruts (7,3,1), peu de carbone organique. Les valeurs (colonne H) de l : c'est-à-dire le carbone organique contenu dans 100 gr de fraction légère, ne sont pas très instructives non plus. Ces valeurs sont très hétérogènes ; elles varient de 20 à 40 % et il n'est pas possible de saisir une corrélation avec les types de sols. Exprimés en % de matière organique (c'est-à-dire $\times 1,72$), les chiffres sont situés entre 35 et 70 % du poids de fraction légère. Mais il est probable, que le coefficient de 1,72 est trop faible, pour ces fractions peu décomposées. L'examen de L (colonne K) : c'est-à-dire le carbone de la fraction lourde, exprimé en % du poids total de cette fraction, n'apporte guère plus de renseignements.

Examinons ensuite la proportion du carbone de l et de L, par rapport au carbone total T de l'échantillon (figure 29, colonne I) ; une première remarque concerne les humus bruts, sous forêts (trame gris foncé), dans les moders, sous pessière (3 de la colonne F) et sous hêtraie (7), le carbone de la fraction légère est important ; il l'est beaucoup moins dans le xéromoder, sous Chêne vert (14).

Les mulls-moders des sols litho-calciques, sous les pelouses alpines et pseudoalpines (2) ont ici aussi un comportement particulier. Malgré l'absence d'argiles et la structure particulière, poudreuse de ces horizons, le carbone de la fraction légère est relativement peu important. Dans les mulls des horizons A₁ de sols litho-calciques à moder (4), de sols humiques carbonatés (8), et de sols bruns calciques (5 et 9), la proportion du carbone surnageant est variable. Mais les valeurs sont en général fortes. A partir des sols bruns calciques, sous les pelouses de la série mésophile du Hêtre (11), le carbone appartenant à la fraction légère est faible ; il le restera à travers les séries du Chêne pubescent et du Chêne vert. Une exception est pourtant à mettre en relief. Elle concerne les deux mulls sous forêts de Chêne vert (15). La proportion de la fraction légère est là plus importante. Cela confirme la remarque déjà faite précédemment, concernant la disparition relativement lente de la fraction légère, sous ces forêts d'Yeuse. Elle est due au climat, mais aussi au caractère xéromorphe des feuilles. Dans les deux échantillons pris sous Chêne pubescent (12), cela n'est pas vérifié, ni sous les pelouses à Brachypode rameux (16).

| TYPES DE SOLS | ETAGES OU SERIES DE VEGETATION | FORMATIONS VEGETALES | TYPES D'HORIZONS | TYPES DE MATIERE ORGANIQUE | N° de REPERAGE pour FIGURES ULTERIEURES | N° des PROFILS | C.org. TOTAL | C. de la fraction LEGERE | C. de la fraction LOURDE | CARBONE de la FRACTION LEGERE (l) ou LOURDE (L) en % du CARBONE TOTAL (T) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|-------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|---|-----------|------|------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| | | | | | | | | | | en % de la terre fine | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | | |
| SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MULL - MODER | PELOUSE PSEUDOALPINE | PELOUSES | A ₀ | MODER | 1 | V 22 I | 26,3 | 31,7 | 12,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₀ | | | V 23 I | 21,0 | 24,0 | 13,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₀ /A ₁ | MULL - MODER | 2 | V 25 II | 15,2 | 24,4 | 14,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₀ /A ₁ | | | V 81 II | 15,0 | 23,9 | 14,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₀ /A ₁ | | | V 117 II | 14,3 | 32,3 | 14,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MODER | SERIE SUBALPINE DE L'EPICEA | FORETS | A ₀ | MODER | 3 | V 32 II | 36,1 | 45,3 | 8,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₀ | | | V 72 IV | 32,9 | 40,3 | 10,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₁ | MULL RICHE EN MAT. ORG. | 4 | V 32 IV | 8,4 | 32,9 | 7,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₁ | | | V 72 III | 23,9 | 33,8 | 19,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A ₁ | | | V 69 III | | | 6,5 | 31,3 | 6,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX | | | SERIE SUBALPINE DE L'EPICEA | FORETS | A ₁ | MULL NORMAL | 5 | V 88 II | 10,6 | 34,9 | 8,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | A ₁ | | | V 141 II | 11,6 | 33,5 | 9,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | (B) | HORIZONS PAUVRES EN MAT. ORG. | 6 | V 88 IV | 3,6 | 35,9 | 4,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | (B) | V 50 V | | | 5,4 | | | 36,0 | 5,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS HUMIQUES CARBONATES | SERIE MESOPHILE DU HETRE | FORETS | | | A ₀ | MODER | 7 | V 16 II | 26,0 | 39,9 | 10,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | A ₀ | | | V 106 II | 30,0 | 43,5 | 9,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | A ₁ | MULL RICHE EN MAT. ORG. | 8 | V 16 IV | 7,4 | 35,2 | 5,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | A ₁ | | | V 106 III | 6,3 | 33,4 | 5,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX | | | SERIE MESOPHILE DU HETRE | FORETS | A ₁ | MULL NORMAL | 9 | V 60 II | 10,7 | 39,2 | 9,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | A ₁ | | | V 62 III | 14,5 | 42,5 | 14,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | (B) | HORIZONS PAUVRES EN MAT. ORG. | 10 | V 60 IV | 1,8 | 42,3 | 4,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | (B) | | | V 62 IV | 5,2 | 44,1 | 4,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX | | | | | SERIE MESOPHILE DU HETRE | PELOUSES | A ₁ | MULL NORMAL | 11 | V 7 I | 6,0 | 32,0 | 5,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | A ₁ | | | V 58 I | 4,1 | 30,8 | 3,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE BRUNIFIES | SERIE DU CHENE PUBESCENT | | | | | FORETS | A ₁ | MULL NORMAL | 12 | MV 40 III | 2,6 | 41,2 | 2,3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | A ₁ | | | MV 41 II | 3,9 | 39,8 | 3,8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE BRUNIFIES | PELOUSES | | | | | A ₁ | MULL NORMAL | 13 | MV 25 I | 3,2 | 33,8 | 2,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | A ₁ | | | MV 66 I | 3,7 | 33,8 | 3,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE BRUNIFIES | SERIE DU CHENE VERT | FORETS | A ₀ | XEROMODER | | 14 | MV 27 II | 18,9 | 38,3 | 15,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₁ | | | | L 23 II | 6,2 | 34,0 | 4,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₁ | MULL NORMAL | | 15 | L 33 II | 3,7 | 32,9 | 3,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | A ₁ | | | | L 28 II | 4,2 | 34,3 | 4,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE BRUNIFIES | | SERIE DU CHENE VERT | PELOUSES | A ₁ | MULL NORMAL | 16 | L 29 II | 3,5 | 32,9 | 3,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | A ₁ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

LEGENDE

I : Carbone de la fraction organique légère en % du Carbone organique total.

L : Carbone de la fraction organique lourde en % du Carbone organique total.

I+L = Carbone TOTAL

HORIZONS A₁ ou A₀/A₁ FORETS PELOUSES

HORIZONS A₀ FORETS PELOUSES

HORIZONS (B) FORETS PELOUSES

A B C D E F G H I L

Figure 29 - Séparation densimétrique des fractions organiques lourdes (L) et légères (l).