

En définitive, la séparation densimétrique a apporté quelques renseignements intéressants. Mais elle a surtout permis d'obtenir des échantillons de fractions lourdes, débarrassées de la matière organique fraîche surnageante. A partir de ces échantillons, l'extraction fractionnée permettra de dégager des données nouvelles.

5.4 - EXTRACTION FRACTIONNÉE DES COMPOSÉS HUMIQUES

5.41 - LA MÉTHODE UTILISÉE

La méthode utilisée est celle de DUCHAUFOR-JACQUIN (1963 et 1966). Dans ce travail, elle a été quelque peu modifiée, d'une part pour l'adapter à ces sols saturés en calcium et d'autre part, pour la simplifier quelque peu ; (Modifiée et y compris la séparation densimétrique, cette méthode exigeait cependant trois à quatre semaines de manipulations, pour quatre échantillons de sol. L'extraction et le dosage des composés humiques ont tous été réalisés en double).

Sur quelques fractions organiques légères et sur les fractions lourdes, la matière organique extractible est obtenue par quatre extractions successives numérotées de 0 à III (figure 30) :

- L'EXTRAIT 0 : la plupart des sols étant saturés ou calcaires, un prétraitement acide a été effectué. L'échantillon est agité à plusieurs reprises, en présence de H_2SO_4 N/10, puis centrifugé jusqu'à élimination complète des carbonates (test à l'oxalate d'ammonium). La solution acide extrait aussi une faible quantité de composés humiques, que nous appellerons EXTRAIT 0. (E.O, dans les figures). Elle correspond à des acides fulviques ; ils sont solubles en milieu acide.

- L'EXTRAIT I : c'est également l'extrait I chez DUCHAUFOR et JACQUIN (1963 - 1966). Il fait suite au prétraitement acide. Il est obtenu par deux extractions successives au pyrophosphate de sodium à 0,1M, avec 7,5 % de sulfate de sodium. Le mélange sol + solution d'extraction est ramené à pH 7, avec de l'acide sulfurique. Les deux extraits I sont mélangés et dosés globalement. (C'est E.I dans les figures).

- L'EXTRAIT II : celui-ci est obtenu par un seul traitement, toujours du même échantillon de sol, au pyrophosphate de sodium seul, à 0,1M et à pH entre 9 et 10. C'est l'extrait II de DUCHAUFOR et JACQUIN (E.II dans les figures).

- L'EXTRAIT III (E.III) : correspond à une dernière extraction à la soude N/10. C'est également E.III chez DUCHAUFOR. La matière organique non extraite s'appelle humine, pour les fractions densimétriques lourdes et matière organique fraîche, pour les fractions légères.

Pour ces dernières, comme nous verrons plus loin, il y a probablement néoformation de composés humiques par la soude. Le schéma de l'extraction fractionnée est représenté dans la figure 30.

Les auteurs de la méthode proposent, pour chaque extrait, une séparation des acides fulviques et humiques, en milieu acide. Ceci n'a pas été réalisé ici et chaque extrait O, I, II, III est dosé globalement : acides humiques + acides fulviques. Le carbone organique est déterminé sur les extraits, par voie humide, après dessiccation sous vide à 35°C. Après addition du mélange sulfochromique, l'oxydation de la matière organique est réalisée pendant 1 heure, dans une étuve à 150°C.

5.42 - EXAMEN DES RESULTATS OBTENUS

Les résultats de l'extraction fractionnée sont représentés dans le tableau 6. Les entrées horizontales de ce tableau c'est-à-dire les colonnes A, B, C sont identiques à celles de la figure 29, affectées des mêmes lettres. Elles permettent de replacer les horizons étudiés dans la série des types de sols, de végétation et de formations végétales. De même, la colonne F porte les mêmes numéros de repérage, que F de la figure 29. Le carbone des extraits O, I, II, III de l'humine ou de la matière organique fraîche est représenté en H ; il est exprimé, en % du carbone total de la fraction densimétrique légère (l) ou lourde (L). l et L sont mentionnées dans la colonne G. Les trames gris foncé et gris clair ont aussi les mêmes significations que dans la figure 29. C'est l'examen et l'interprétation des données de ce tableau, qui font l'objet de ce paragraphe. Ils exigent des représentations graphiques plus synthétiques, que le simple exposé des données brutes, sous forme de tableau.

5.421 - TAUX D'EXTRACTION - HUMINE - MATIERE ORGANIQUE FRAICHE

Le premier paramètre examiné concerne le taux d'extraction. Dans les chapitres précédents et en particulier dans la figure 28 page 137, il s'agissait déjà de taux d'extraction. C'était le carbone extrait au pyrophosphate de sodium, exprimé en % du carbone total du sol. Ce taux concerne donc l'échantillon global, c'est-à-dire la fraction lourde + légère. En plus il n'est obtenu, qu'à partir d'une seule extraction : au pyrophosphate de sodium uniquement. C'est le taux d'extraction au sens large (s.l.). Le taux d'extraction utilisé dans ce chapitre a une autre définition. C'est le carbone organique obtenu par les extraits O + I + II + III exprimés en % du carbone organique total de la fraction densimétrique lourde ou légère (figure 30). C'est de ce taux d'extraction, sensu stricto (s.s.), qu'il s'agit dans ce chapitre. La méthode d'extraction fractionnée

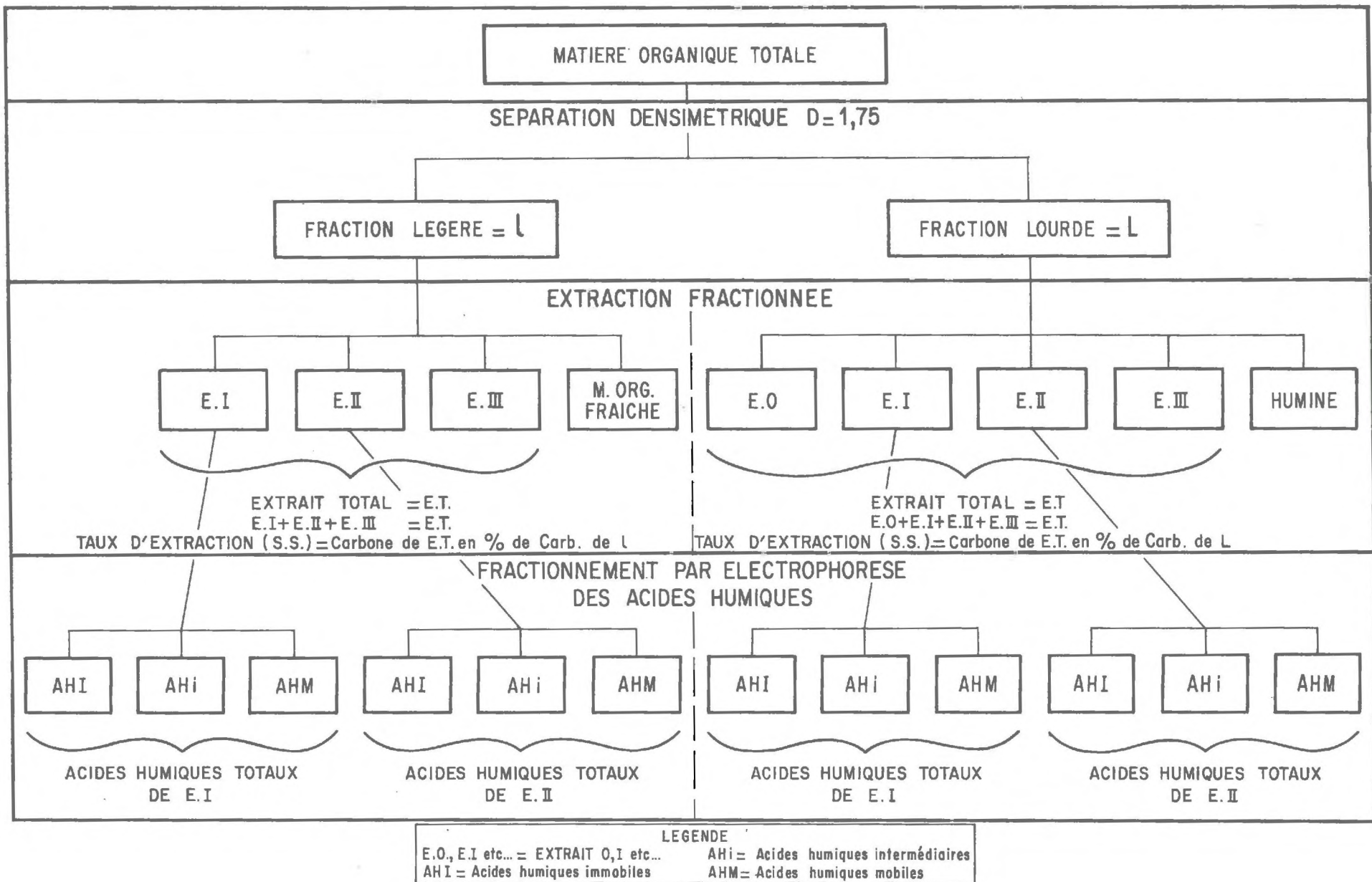


Figure 30 – Schéma de la séparation densimétrique de la matière organique totale, de l'extraction fractionnée des composés humiques et du fractionnement par électrophorèse des acides humiques.

A TYPES DE SOL	B ETAGES OU SERIES DE VEGETATION	C FORMATIONS VEGETALES	D TYPE D'HORIZON	E N° de REPERAGE	F N° de PROFIL	G FRACTIONS DENSIMÉTRIQUES	H				
							E.O	E.I	E.II	E.III	HUMINE M.O. FRAICHE
							en % du carbone organique de fraction densimétrique				
SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MULL-MODER	PELOUSE PSEUDOALPINE	PELOUSES	Ad	1	V22 I	L	3,9	15,0	3,5	15,9	61,7
			Ad		V23 I	L	4,7	14,7	3,4	17,7	59,5
			A0/A1	2	V25 II	L	5,2	16,1	4,3	24,2	50,2
			A0/A1		V81 II	L	5,5	16,5	3,4	20,5	54,1
SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MODER	SERIE SUBALPINE DE L'EPICEA	FORETS	Ad	3	V32 II	L	1,8	4,9	2,2	14,8	77,0
			Ad		V72 I	L	2,8	5,9	3,1	15,8	72,5
			A1	4	V32 IV	L	12,5	37,1	5,8	14,0	30,6
A1			V72 III		L		24,2	4,2	13,1	58,5	
A1			V69 III		L	6,7	18,3	5,1	13,2	56,7	
SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX			A1	5	V88 II	L	7,9	23,6	4,4	15,9	48,2
		V141 II			L		19,2	4,1	16,8	59,9	
(B)		6	V88 IV	L	9,0	22,2	5,2	10,5	53,1		
			V50 V	L	9,3	18,5	6,2	14,8	52,4		
SOLS HUMIQUES CARBONATES		SERIE MESOPHILE DU HETRE	FORETS	Ad	7	V16 IF	L	2,7	5,5	1,9	9,2
	Ad			V105 II		L	2,2	5,0	2,1	11,3	78,4
A1	8			V16 IV	L	5,8	18,4	5,3	18,5	52,0	
A1				V106 III	L	5,8	16,0	4,4	16,3	57,5	
A1				9	V60 II	L		9,1	2,5	15,2	73,2
A1	V62 III				L		6,3	2,3	12,9	78,5	
SOLS BRUNS CALCIQUES MODAUX	(B)		10	V60 IV	L	10,0	21,6	4,3	11,9	52,2	
				V62 IV	L	10,0	20,2	7,7	15,1	47,0	
A1	PELOUSES		11	V71 I	L	4,6	13,0	4,5	15,1	62,8	
				V58 I	L	3,9	12,8	4,6	16,3	62,4	
SOLS FERRIALLITQUES A RESERVE CALCIQUE BRUNIFIES	SERIE NORMALE DU CHENE PUBESCENT	FORETS	A1	12	MV40 III	L	5,3	10,8	6,9	11,0	66,0
			A1		MV41 II	L	5,8	9,6	4,4	12,8	67,4
		PELOUSES	13	MV25 I	L	7,1	15,0	8,1	12,9	56,9	
				MV66 I	L	5,6	16,5	4,8	12,3	60,8	
	SERIE DU CHENE VERT	FORETS	14	MV27 II	L	4,9	13,5	2,4	10,8	58,4	
				A1	15	L23 II	L	5,0	14,8	5,0	11,4
		A1	L33 II	L		8,5	19,5	3,2	15,3	53,5	
		PELOUSES	16	L28 II	L	4,8	16,2	4,1	11,9	63,0	
L29 II	L			2,5	19,4	3,1	8,3	66,7			

Tableau 6 - Extraction fractionnée : carbone organique des extraits O, I, II, III et Humine ou matière organique fraîche en % du carbone organique total de la fraction densimétrique légère (l) ou lourde (L).

permet d'examiner deux autres paramètres déjà présentés ci-dessus. Il s'agit d'une part de l'humine (s.s.) c'est le carbone organique non extrait en % du carbone de la fraction lourde, et d'autre part, de la matière organique fraîche (s.s.) qui n'existe, par contre, que dans les fractions légères (figure 30).

Ce sont ces trois valeurs : taux d'extraction, humine et matière organique fraîche, qui sont représentées dans la figure 31. Dans celle-ci les fractions densimétriques légères sont à gauche. Elles sont, toujours de la même manière, représentées sur une trame gris foncé. Les fractions lourdes sont à droite ; elles sont sur fond blanc, pour les mulls et mulls-moders et sur fond gris clair, pour les horizons (B), comme dans les figures précédentes. Les numéros, à la tête de chaque colonne verticale, sont toujours les mêmes numéros de repérage, déjà présentés en F du tableau 6 et de la figure 29. Ils permettent de détecter les horizons et les profils étudiés. Certains d'entre eux sont uniquement à gauche de la figure (3, 7, 14) ; ce sont des horizons A₀, dont seule la fraction légère a été analysée. La plupart sont uniquement à droite : là, seule la fraction lourde a été soumise à l'extraction. Enfin, les numéros 1 et 9 apparaissent, à la fois dans les deux parties de la figure : les deux fractions densimétriques, suffisamment abondantes, ont été analysées. L'échelle qui sépare les deux parties de la figure exprime le taux d'extraction en % du carbone organique total de la fraction densimétrique.

LE CALCUL D'ERREUR

Avant d'examiner les résultats, précisons la manière selon laquelle a été réalisé le calcul d'erreur. Rappelons que les analyses concernant E.I, E.II, et E.III ont été faites en double. Le dosage du carbone organique total de la fraction densimétrique a été réalisé en triple. Les chiffres, obtenus pour un même échantillon, sont en effet, ici plus hétérogènes, que ceux des extraits liquides.

- soit $E.O + E.I + E.II + E.III = ET$ (Extrait Total)
- soit $CT =$ carbone total de la fraction densimétrique
- taux d'extraction = $EX = \frac{ET \times 100}{CT}$

Pour chaque échantillon on a donc deux valeurs de ET et trois valeurs de CT. Une valeur moyenne de ET a d'abord été calculée = \overline{ET} puis une valeur moyenne de $CT = \overline{CT}$ et enfin $\overline{EX} = \frac{\overline{ET} \times 100}{\overline{CT}}$

Ces valeurs moyennes \overline{EX} sont, dans la figure 31, pour chaque échantillon, portées dans la colonne correspondante (voir légende de la figure).

- Par ailleurs soit :

ET_1 = la valeur la plus faible, des deux valeurs de ET

ET_2 = la plus forte

- soit aussi :

CT_1 = la valeur la plus faible des trois valeurs de CT

CT_3 = la valeur la plus forte

- il en résulte que :

$$\frac{ET_1 \times 100}{CT_3} = EX_i = \text{la valeur la plus faible de EX}$$

- de même :

$$\frac{ET_2 \times 100}{CT_1} = EX_j = \text{la valeur la plus forte de EX}$$

$EX_j - EX_i$ = l'erreur absolue des 2 ou 3 dosages pour un même échantillon

On a établi, pour l'ensemble des échantillons, la corrélation entre :

$$EX_j - EX_i \text{ et } \bar{EX}$$

On obtient un coefficient de corrélation : $r = 0,06$ pour un nombre d'échantillons : $n = 45$

r est faible et il n'existe donc pas de corrélation entre ces deux grandeurs. On en déduit, que les erreurs absolues sont indépendantes des valeurs absolues. Elles constituent donc une population, à partir de laquelle il est permis d'estimer un écart type et un intervalle de confiance, pour l'ensemble des échantillons. Le but de ces calculs, était d'obtenir un ordre de grandeur de la dispersion des valeurs, à partir de dosages effectués simplement en double ou en triple, mais réalisés sur un grand nombre d'échantillons ($n = 45$).

La corrélation a également été testée entre $ET_2 - ET_1$ et \bar{ET} , puis $CT_3 - CT_1$ et \bar{CT} : dans les deux cas, elle n'est pas non plus significative. L'absence de corrélation, entre l'erreur absolue et la valeur absolue n'est pas paradoxale ici, puisque les prises d'échantillons étaient variables : 0,2 à 0,5 grammes de fraction densimétrique, quand celle-ci contenait beaucoup de carbone et 1 gramme à 1,5 gr, quand elle en contenait peu. De même la prise d'échantillon en vue des extractions était variable : 5 à 35 grammes, suivant la teneur en carbone total. Enfin, pour le dosage du carbone des différents extraits, les prises étaient également proportionnées : de 150 cc (E.0) à 25 cc (E.I ou E.III), suivant la coloration, plus ou moins foncée, du liquide.

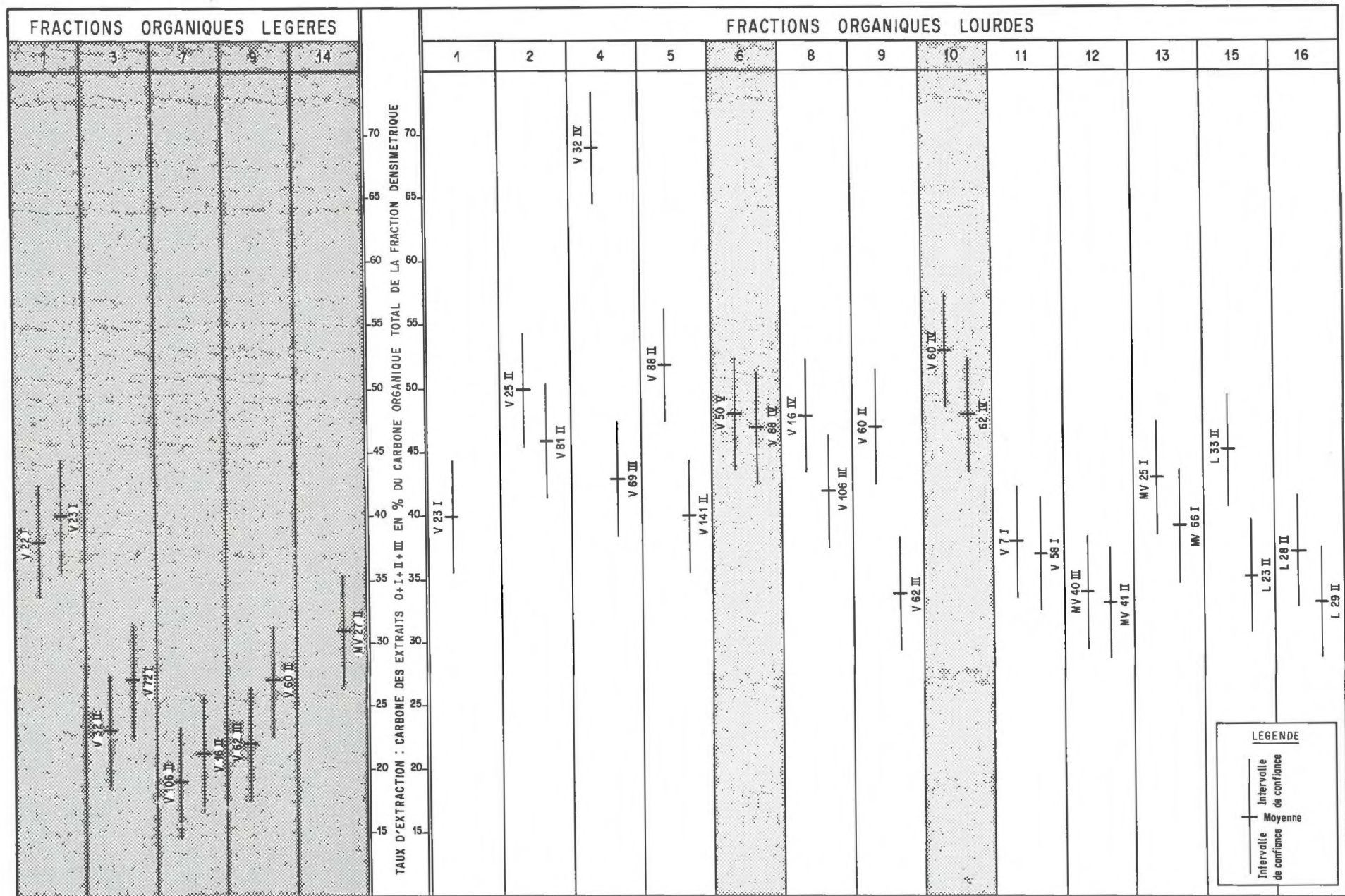


Figure 31 - Taux d'extraction : carbone organique des extraits O+I+II+III en % du carbone organique total de la fraction densimétrique.

Dans la figure 31, les traits fins verticaux, de part et d'autre de la moyenne, correspondent à 2 fois l'intervalle de confiance : 1 fois de part et d'autre de la moyenne (voir légende de la fig.). Ils représentent les limites entre lesquelles varie la valeur de l'échantillon avec une probabilité de 95 %.

Ces précisions, concernant les calculs d'erreurs, s'avèrent nécessaires et ceux-ci seront appliqués également dans les figures suivantes.

INTERPRETATION DES RESULTATS

A la suite de ces indications, il s'agit maintenant d'interpréter la figure 31. Elle représente donc le taux d'extraction, qui est lu sur l'échelle. Mais elle donne aussi les valeurs de l'humine, pour la fraction lourde et de la matière organique fraîche, pour la fraction légère, puisque ces deux valeurs sont complémentaires de la première, par rapport à 100 %. Les échantillons, dont le taux d'extraction est faible et l'humine importante, sont en bas de l'échelle et ceux, qui présentent les caractères inverses, sont en haut de l'échelle. Trois faits sont à mettre en évidence.

- D'abord on constate, que les taux d'extraction sont plus faibles pour les fractions légères, que pour les fractions lourdes. Dans les premières, les échantillons, correspondant aux colonnes 3, 7, 9 et 14 ne varient pas d'une façon significative.

- Parmi les fractions légères, celles provenant des sols lithocalciques à mull-moder (colonne 1) ont un taux d'extraction significativement plus élevé que les autres échantillons. Ce type de matière organique est original ; d'autres paramètres le vérifieront.

- En ce qui concerne les fractions densimétriques lourdes, les résultats, obtenus à partir du calcul d'erreur, ne permettent pas d'établir des différences bien significatives entre les types de matière organique. Cependant, un fait est à remarquer et il sera complété ou expliqué, dans les autres figures de ce chapitre : les échantillons de la colonne 10 qui représente les horizons (B) des sols bruns calciques sous hêtraie, contiennent moins d'humine, que les horizons A₁ correspondant et qui sont dans la colonne 9. Le taux d'extraction est plus élevée en (B) qu'en A₁. L'examen de cette figure ne permet pas de formuler d'autres conclusions.

En définitive, les valeurs du taux d'extraction et de l'humine sont assez voisines, à travers ces sols. Les renseignements obtenus sont peu nombreux. Il est possible, que dans la proportion de matière organique encore retenue, après les quatre extractions, la quantité et la nature des argiles jouent un rôle. Mais ce domaine n'a pas été exploré dans ce travail.

5.422 - IMPORTANCE DE E.I, E.II et E.III, EN % DES COMPOSES

HUMIQUES TOTAUX EXTRAITS

L'examen de la proportion des extraits 0, I, II et III, par rapport aux composés totaux extraits, est plus instructif. Rappelons ou définissons les termes utilisés. On a :

$$E.O + E.I + E.II + E.III = ET \text{ (voir figure 30)}$$

ET correspond aux extraits totaux, encore appelés composés humiques totaux extraits. Dans les deux figures 32 et 33, qui vont être examinées :

$$E.O + E.I + E.II + E.III = ET = 100 \%$$

Il convient d'abord d'envisager la signification des différents extraits, sur le plan pédologique. E.O n'apporte pas de renseignements : les quantités de carbone extraites sont toujours faibles ; ce sont des acides fulviques. L'extrait I est par contre plus instructif ; il est obtenu par du pyrophosphate de sodium à pH 7, en présence de sulfate de sodium, dont le rôle est de maintenir les argiles sous forme floculée. Cette fraction de matière organique est facilement extractible. Selon les auteurs de la méthode, elle correspondrait aux composés humiques liés aux argiles, essentiellement par l'intermédiaire du calcium. Cette hypothèse sera également soutenue ici. En E.II on extrait peu de carbone et les proportions mises en solution sont à peu près identiques, dans tous les sols. L'extrait III donne aussi des indications précieuses ; il correspond au carbone mis en solution par la soude, donc fortement lié dans le complexe organo-minéral, dans le cas des fractions lourdes. La signification de E.III provenant des fractions légères est discutable, puisqu'il y a probablement néoformation de composés humiques, à partir de la matière organique fraîche. Dans la suite une importance sera donc attachée d'une part aux extraits 0 + I et d'autre part à l'extrait III.

La figure 32 correspond aux fractions densimétriques légères. Les numéros de profils sont sur fond gris foncé. Les résultats sont exprimés sous forme cumulative : en A, sont les valeurs de E.O, en B, celles de E.O + E.I, en C, celles de E.O+E.I+E.II ; les valeurs de E.III sont complémentaires des précédentes, puisque le total = 100 %. L'échelle D correspond aux valeurs de E.III ; elle est lue du haut en bas ; les trois précédentes sont lues du bas en haut. Par exemple, si E.O + E.I + E.II = 60 %, E.III = 40 %. Les droites qui relient A à B puis à C correspondent chacune à un échantillon. Ce sont les "courbes" cumulatives. Le numéro des échantillons correspondants est placé à droite de la figure, dans les colonnes 1, 3, 7, 9, 14. Celles-ci sont toujours numérotées de la même manière que dans les figures 29 et 31 et le tableau 6. Les fractions densimétriques, dont E.III est faible et dont E.O + E.I + E.II est élevé, sont donc placées en haut dans les colonnes. Celles, par contre, dont E.III est fort, sont placées en bas.

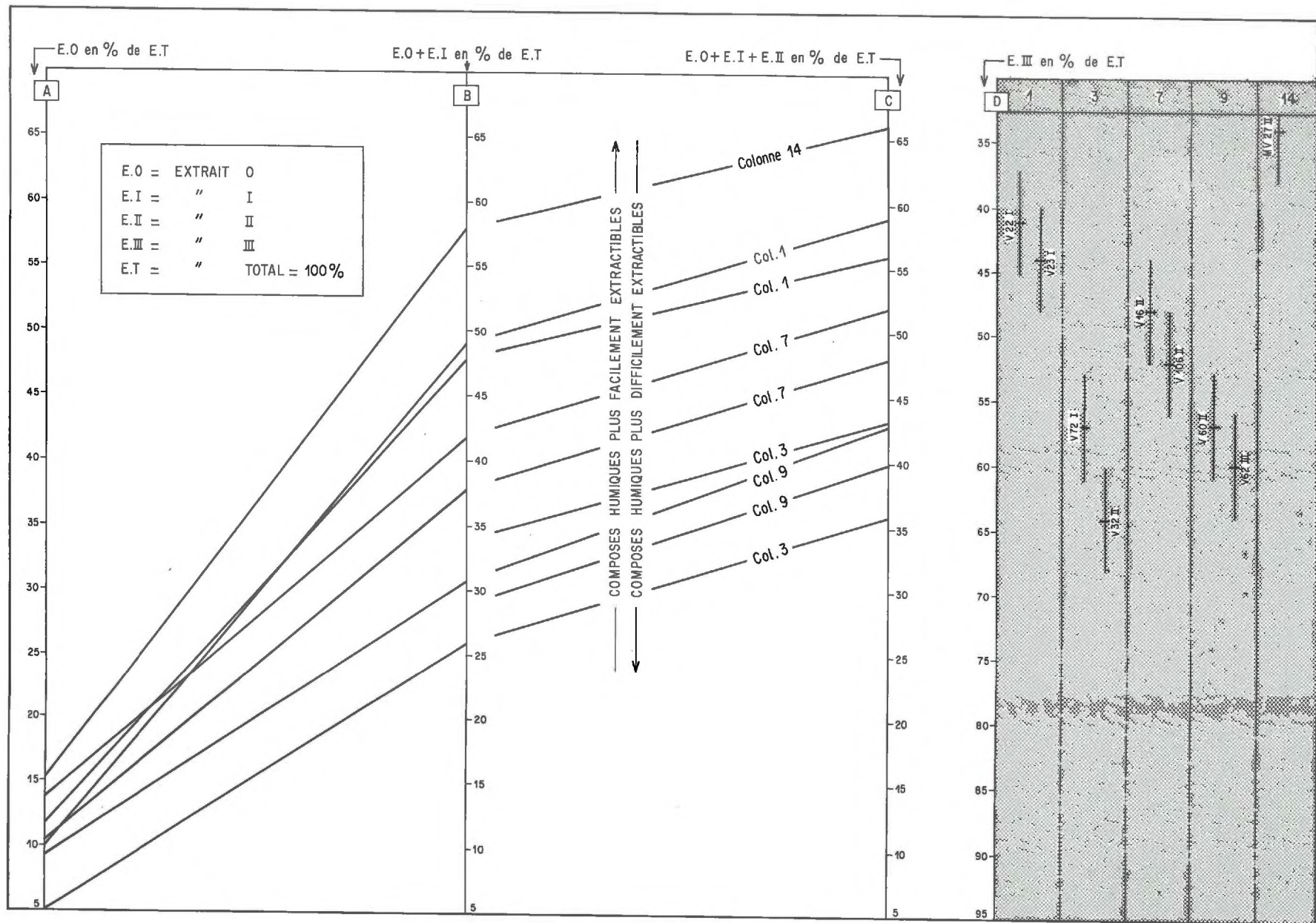


Figure 32 - Fractions densimétriques légères : proportion de E.O, E.I, E.II et E.III en % des extraits totaux E.T.

L'erreur a également été calculée ici, comme précédemment et les intervalles de confiance sont indiqués pour chaque échantillon.

Dans l'interprétation des résultats, il faut d'abord remarquer que la proportion de carbone extrait en E.II est partout identique. En effet, les droites entre B, qui correspond à E.O + E.I, et C, qui correspond à E.O + E.I + E.II, sont à peu près toutes parallèles. Dans ces fractions légères, les composés extraits en E.III sont néoformés. Cette néoformation est importante dans les fractions légères des horizons A₀ sous pessière (colonne 3) ou sous hêtre (7, 9) ; elle est plus réduite dans le xéromoder sous Chêne-vert, dont les feuilles sont plus xéromorphes.

Toujours parmi les fractions légères, un autre type d'humus se distingue ; il correspond à la colonne 1. C'est la fraction légère des A₀ ou des mull-moders dans les sols litho-calciques à mull-moder, sous les pelouses pseudoalpines. Cette fraction s'était déjà distinguée, dans la figure 31 (colonne 1), par sa matière organique fraîche relativement peu abondante. On voit, sur la figure examinée ici, que la proportion de composés humiques extraits par la soude est également faible. Il convient simplement de retenir cette constatation ; elle sera expliquée plus loin.

Il reste à examiner les résultats concernant les fractions densimétriques lourdes. Les renseignements obtenus ici sont intéressants. Ils sont donnés dans la figure 33. Celle-ci est quelque peu complexe et demande des explications. Deux parties la composent : l'une à droite, l'autre à gauche. Chacune porte les colonnes, numérotées de la même manière que précédemment. Les horizons A₁ sont sur fond blanc, les horizons (B) sur fond gris clair. Les horizons A₀ ont déjà été étudiés ci-avant. Cette figure est construite de la même manière que la précédente. La partie gauche porte les mêmes indications que la ligne B de la figure 32, c'est-à-dire E.O + E.I en % de ET et les valeurs sont lues sur l'échelle B. De même, la partie droite porte les mêmes indications que celles des lignes C et D de la figure 32, c'est-à-dire E.O + E.I + E.II en % de ET et la lecture se fait sur l'échelle C, ou bien E.III en % de ET, la valeur complémentaire, et sa lecture est faite sur l'échelle D, à droite ; comme précédemment, B et C sont gradués du bas en haut, et D du haut en bas. La différence de cette figure, avec la précédente, tient d'une part, au fait que ici les valeurs de E.O ne sont pas représentées comme sur la ligne A de la figure 32. Par ailleurs ici ne sont pas représentées non plus les "courbes" cumulatives. Finalement, l'utilisation de cette figure est simple : les valeurs E.O + E.I sont dans les colonnes de gauche, la lecture est faite en B. Les valeurs E.O + E.I + E.II (lecture en C) et E.III (lecture en D) sont dans les colonnes de droite. Les échantillons, dont les composés humiques sont facilement extraits (E.O + E.I et E.O + E.I + E.II = élevés et E.III = faible) sont situés vers

le bas des colonnes. Par contre, ceux dont les composés sont difficilement extractibles (E.O + E.I et E.O + E.I + E.II = faibles et E.III élevé) sont placés vers le haut des colonnes. Enfin, il faut ajouter le détail suivant : si deux horizons font partie d'un même profil, ils sont réunis par une flèche : par exemple, le numéro V 60 II de la colonne 9 est réuni avec le numéro V 60 IV de la colonne 10. Ce sont deux horizons du profil numéro V 60 ; l'un correspond à A_1 , l'autre à (B).

ILLUVIATION DE COMPOSES HUMIQUES DANS LES SOLS BRUNS CALCIQUES

Considérons d'abord ces horizons (3) (sur fond gris clair). Il s'agit des horizons V 88 IV et V 50 V de la colonne 6 ; ils proviennent de sols bruns calciques, sous la pessière. Au premier, correspond le numéro V 88 II de la colonne 5 ; c'est l'horizon A_1 du même profil. La colonne 10 correspond également à des (B), dont les horizons A_1 sont en 9. Ce sont là des sols bruns calciques sous hêtraie. On constate, que les horizons (B) ont des composés plus facilement extractibles, que les horizons A_1 correspondants. En effet, dans la partie gauche de la figure, les valeurs de (B) sont placées plus haut que celles de A_1 : la proportion de E.O + E.I est plus importante en (B) qu'en A_1 . Il en est de même, pour la partie droite de la figure. Les valeurs de (B) sont également placées plus haut dans la figure que celles de A_1 . Ceci signifie donc, que les composés humiques des horizons profonds sont moins énergiquement liés, que ceux des horizons de surface. Dans les premiers, ils sont dissouts en majorité au pyrophosphate de sodium, dans les seconds en majorité à la soude. Compte tenu des intervalles de confiance, ces différences sont significatives. Au début de ce chapitre, l'hypothèse d'une illuviation des composés humiques, à faible poids moléculaire, des horizons A_1 de sols bruns calciques, vers les horizons (B), avait été proposée.

Explicitons davantage cette hypothèse. Dans ces milieux, la décarbonatation est importante. Les ions calciques, fortement entraînés es horizons A_1 vers les horizons (B) et au-delà, sont constamment renouvelés à partir de la réserve calcique, qui existe dans tous les horizons. Sous la pessière, un léger déficit en A_1 a été mis en évidence ; le complexe absorbant est désaturé ; le pH (H_2O) est de l'ordre de 6. Sous la hêtraie, l'horizon A_1 est proche de la saturation et son pH (H_2O) est de 6,5. Dans les deux cas, les horizons (B) sont calcaires et les valeurs de pH (H_2O) sont situées entre 7,5 et 8. Le calcium migre à travers le profil, probablement sous deux formes : d'abord comme bicarbonate ; le calcaire est dissout par le CO_2 . Au sujet des lois d'équilibre entre CO_2 et CO_3Ca , un article de synthèse a été publié par CARO (1965). Le calcium est probablement aussi capable de migrer lié aux composés organiques solubles. A l'état actuel de nos recherches, la prédominance de l'une ou de l'autre de ces formes n'est pas connue dans ces sols.

Le fer et l'aluminium sont également liés à la matière organique. Comme l'a montré LOSSAINT (1959), les complexes fer-matière organique sont solubles en milieu faiblement calcique. Ils sont immobiles en milieu très calcique. Les chapitres précédents ont en effet montré que l'illuviation du fer et aussi de l'aluminium était pratiquement inexistante dans les sols calciques sous la hêtraie. A_1 est là saturé. Elle avait lieu mais d'une manière réduite, dans les sols sous la pessière partiellement désaturés. Les indices d'entraînement restent faibles dans tous les cas. Le fer est immobilisé dans les horizons (B) saturés.

Dans ces sols bruns calciques, ce sont probablement les composés humiques mobiles liés au calcium, qui sont les plus abondants. Ils sont responsables de la différenciation qui a été observée à travers les profils, soit dans les rapports acides humiques/acides fulviques, soit dans l'extraction fractionnée.

Il faut ajouter à cela la biodégradation des composés humiques pendant leur migration. Elle a été étudiée par BRUCKERT et DOMERGUES (1966, 1968). Elle a été décelée ici, par un moyen simple, exposé précédemment : les rapports C/N restent relativement élevés à des profondeurs plus grandes sous la pessière ou sous les horizons A_0 , que sous la hêtraie sans humus brut. Dans le premier cas, la biodégradation est plus lente, parce que les conditions climatiques, en particulier les températures basses (BRUCKERT et DOMERGUES, 1968), sont plus défavorables et parce que les composés humiques provenant de la pessière ou des horizons A_0 sont plus résistants (DUCHAUFOUR, 1968).

Notre hypothèse est donc la suivante : il y a illuviation de composés humiques, des horizons A_1 vers les horizons (B). Ils sont en majorité liés au calcium. Une faible quantité est liée au fer et à l'aluminium. Il n'est pas exclu, qu'à la fonte des neiges, ces sols soient davantage désaturés en A_1 et permettent une illuviation d'une fraction des composés humiques non neutralisés par le calcium. Dans les horizons (B) généralement calcaires ou à pH basiques : entre 7,5 et 8, les composés précipitent et se polymérisent. Ils forment là, un complexe organo-minéral stable. La polymérisation est cependant limitée, en raison de l'abondance des ions calciques. Ils forment, dans les horizons profonds, appelés ici (B), un type de matière organique semblable à celui des rendzines à calcaire actif, dont les composés humiques sont également extractibles dès E.I ou E.II. La matière organique est, dans ces (B), plus rapidement extraite que dans les horizons A_1 moins calciques.

ELIMINATION DE COMPOSES HUMIQUES DES SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFERES A MODER

Une explication semblable est proposée pour les types de matière organique des colonnes 4 de la figure 33. Ce sont des mulls,

situés sous les horizons A₀, des sols litho-calciques à moder des pessières. Leurs composés humiques sont aussi facilement extractibles. On constate en effet, que ces échantillons sont placés vers le haut des colonnes. E.O + E.I (échelle B) est élevé ; il en est de même, pour E.O + E.I + E.II (échelle C). E.III est faible (D).

Ces horizons A₁ sont originaux par quatre caractères. Ils sont intensément percolés, parce que les précipitations sont très importantes et parce qu'ils sont disposés en "entonnoir". Cela a déjà été expliqué précédemment ; il suffit, pour le comprendre, de revoir le schéma de ce type de profil, dans la figure 3 page 38 . Par ailleurs, ils sont situés sous un horizon A₀ généralement épais et dont les composés humiques traversent les mulls sous-jacents. Ces horizons A₁ sont particulièrement appauvris en fer (figure 7, page 45). Enfin, leur taux de saturation est fidèlement regroupé autour de 100 %, quelle que soit la valeur de T. Le renouvellement des ions calciques, à partir du squelette, est parfaitement assuré, dans ces sols très percolés (Fig. 5, page 41). La pauvreté en fer de ces horizons avait été expliquée, dans un chapitre précédent, par l'élimination au-delà du profil, des composés du fer avec la matière organique. En effet, ceux-ci sont lentement biodégradés : d'une part, la matière organique est issue de litière de résineux ou d'horizons A₀ ; par ailleurs, les conditions climatiques sont défavorables. Les composés organiques solubles et le fer traversent l'horizon A₁ saturé, mais non calcaire. Dans ces mulls tout à fait particuliers, la matière organique stable est donc liée aux argiles, essentiellement par le calcium. C'est la raison pour laquelle les composés humiques sont extraits en majorité dès E.I et E.II. Les molécules organiques, restées solubles ou pseudosolubles, sont probablement simplement en transit. Elles sont éliminées comme le fer ou le calcium au-delà du profil, le long des parois du karst médian.

MAINTIEN DES COMPOSÉS HUMIQUES DANS LES SOLS LITHO-CALCIQUES HUMIFÈRES

A MULL-MODER

Dans la figure 33, un autre cas intéressant est celui des colonnes 1 et 2. Il s'agit pour 1, de la fraction lourde de A₀ de sols litho-calciques à mull-moder et pour 2, de la fraction lourde des mulls-moders des mêmes types de sols. Ils sont sous les pelouses alpines ou pseudo-alpines. On constate, que dans les fractions lourdes de ces humus, les extraits E.O + E.I sont peu importants, de même E.O + E.I + E.II est faible ; par contre, E.III est élevé. Les valeurs sont placées en bas des colonnes. Les composés humiques sont donc difficilement extractibles. C'est l'inverse des types de matière organique discutés précédemment. Or, comme ceux-ci, ces horizons A₀/A₁ sont saturés. La forte proportion de E.III dans ces sols est difficile à expliquer. Il faut cependant se rappeler un autre caractère

CARBONE ORGANIQUE DES EXTRAITS O+I en % du CARBONE ORGANIQUE DES EXTRAITS TOTAUX

CARBONE ORGANIQUE DES EXTRAITS O+I+II en % du CARBONE ORGANIQUE DES EXTRAITS TOTAUX

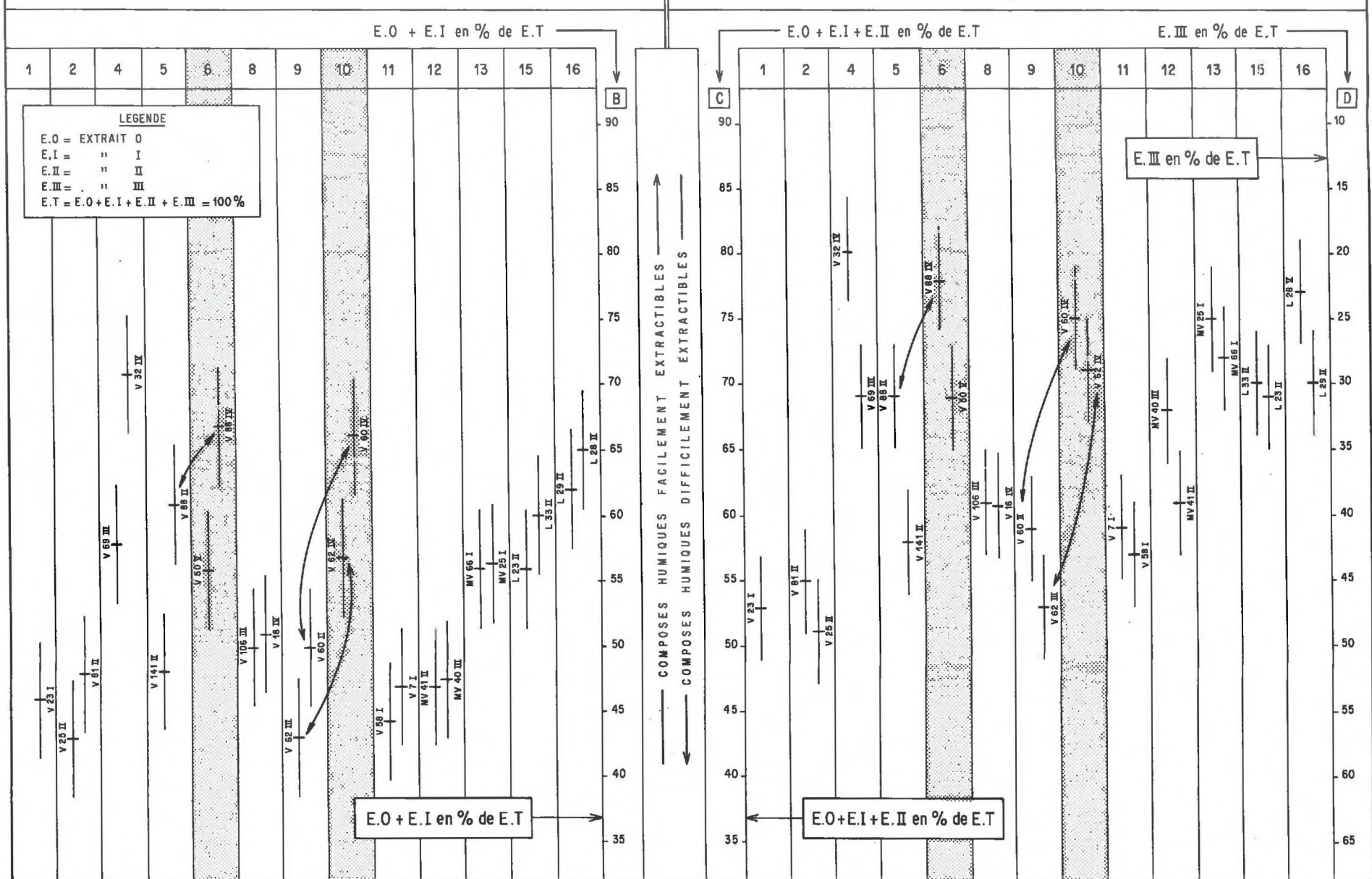


Figure 33 - Fractions densimétriques lourdes : proportion de E.O, E.I, E.II et E.III en % des extraits totaux E.T.

original de ces mulls-moders : ils sont très riches en fer (de l'ordre de 8 %) et celui-ci se trouve à 90 % sous forme libre. Dans ces horizons très organiques, les composés humiques liés par le fer sont probablement importants. Ils ne seraient pas entraînés comme sous les A₀ et sous les résineux, parce que les pelouses sous lesquelles se trouvent ces mulls-moders ne sont pas génératrices d'humus brut et de composés difficilement biodégradables. Les C/N de ces mulls-moders sont en effet bas : de 12 à 8, contre 20 à 25 dans les moders sous pessière ou hêtraie. Les complexes solubles du fer auraient donc ici probablement une vie très brève. Ces mulls-moders ont des caractères très particuliers et pour les expliquer d'autres méthodes méritent d'être appliquées.

La décarbonatation dans ces sols est probablement encore importante. Les cailloux sont en général arrondis, malgré la forte gélifraction. Les eaux froides dissolvent le calcaire. Il est par contre plus difficile de présager de l'action des acides organiques. Leur durée et leur activité est vraisemblablement plus brève et moins importante, que sous les moders ou les litières acides. Les gradients de S/T, à travers ces sols litho-calcaïques à mulls-moders, restent en effet limités.

MAINTIEN DES COMPOSÉS HUMIQUES DANS LES SOLS FERIALLITTIQUES BRUNIFIES

Dans la figure 33, un autre point est à mettre en évidence et mérite d'être discuté : c'est la quantité relativement faible du carbone extrait en E.III, dans les sols soumis aux conditions méditerranéennes. Il s'agit des sols fersiallitiques à réserve calcique. Considérons dans la figure les colonnes suivantes : 9 ce sont les horizons A₁ des sols bruns calciques dont les horizons (B) ont déjà été discutés, ils sont sous hêtraie, 11 il s'agit d'horizons A₁ des mêmes sols, sous pelouses de dégradation de la hêtraie mésophile. Les colonnes 12 et 13 correspondent aux A₁ de sols fersiallitiques à réserve calcique sous forêts (12) et sous pelouses (13) de la série du Chêne pubescent. Enfin, les colonnes 15 et 16 sous la série du Chêne vert (15 : forêts, 16 : pelouses à Brachypode rameux). Il s'agit donc, de 9 à 16, d'horizons A₁, c'est-à-dire de mulls d'horizons de surface et ils sont échelonnés de la hêtraie, à la chênaie d'Yeuse. On constate, que la proportion de E.O + E.I (à gauche), puis de E.O + E.I + E.II (à droite) est de plus en plus importante, celle de E.III de moins en moins grande. De la hêtraie, à la chênaie d'Yeuse, les composés humiques sont donc de plus en plus facilement extractibles. Ils sont placés de plus en plus haut dans la figure. On constate, en particulier, que les mulls des sols fersiallitiques sous Chêne vert (15) et sous les pelouses à Brachypode rameux (16) ont une proportion de E.III aussi réduite que dans les horizons (B) des sols bruns calciques (6 et 10) discutés précédemment. Comment expliquer ces variations en fonction des conditions bioclimatiques ? Pour simplifier l'exposé comparons les mulls sous hêtraie à ceux sous la chênaie d'Yeuse.

Dans la figure 31 page 149 , l'importance de l'humine ne semble pas varier d'une manière significative. Seule la proportion des différents extraits permet donc de les distinguer. Par ailleurs, il convient de se rappeler un certain nombre de points, exposés précédemment. Les mullis des sols fersiallitiques à réserve calcique sont fortement saturés ; leur pH est basique et le gradient de pH et de S/T à travers le profil est faible. Par contre, il est plus important dans les sols bruns calciques sous hêtraie, où A_1 est légèrement désaturé, acide ou proche de la neutralité. Le rapport fer libre/fer total reste relativement élevé, dans les horizons A_1 des sols bruns calciques (de l'ordre de 70 %) et ils contiennent aussi une certaine proportion d'aluminium libre (de l'ordre de 10 %). Dans les sols fersiallitiques à réserve calcique, l'aluminium libre est très faible (5 %) ; mais le rapport fer libre/fer total est à peine plus bas (65 à 70 %). Enfin, un dernier point nous semble important à signaler, il a été démontré dans la figure 27, page 137 : le rapport acides humiques/acides fulviques varie d'une manière probablement significative, à travers les sols bruns sous la hêtraie ; cela n'est plus le cas pour les sols méditerranéens. L'interprétation était la suivante : dans ces derniers sols, l'illuviation d'acides organiques, à poids moléculaire faible, n'a plus lieu ; les milieux sont trop basiques, dès les horizons A_1 de surface. Les composés humiques sont biodégradés ou polymérisés sur place.

Ceci amène l'explication des faits observés dans la figure 33. Elle est identique à celle, qui a déjà été proposée précédemment. Les sols bruns calciques sont percolés d'acides organiques, qui entraînent les ions calciques. Les sesquioxides ne sont pas entraînés sous la hêtraie. Dans les horizons A_1 , les composés humiques liés au fer et à l'aluminium sont plus difficilement extractibles, que ceux liés au calcium dans les horizons (B).

Dans les sols fersiallitiques à réserve calcique, les composés humiques solubles migrent faiblement à travers le profil. Ils sont probablement vite biodégradés, parce que les températures sont plus favorables à l'activité microbologique. Dans ces milieux saturés dès la surface, ils sont aussi rapidement neutralisés, immobilisés, puis polymérisés. Il est probable, que dans ces sols méditerranéens, l'entraînement des ions calciques, par les acides organiques soit faible. Selon l'hypothèse proposée précédemment, les composés humiques seraient donc, dès l'horizon A_1 , liés aux argiles en grande partie par l'intermédiaire du calcium, ce qui les rend facilement extractibles. Qu'en est-il des composés du fer ? Si l'hypothèse est vérifiée, le fer jouerait un moindre rôle dans le complexe organo-minéral, que le calcium. Cette conclusion aurait, dans ce cas, une grande portée. En effet, elle signifierait, que le fer des sols anciens serait repris par la brunification actuelle dans une faible proportion et la pédogénèse actuelle serait du type sols bruns calcaires ou fortement calciques, dans lesquels

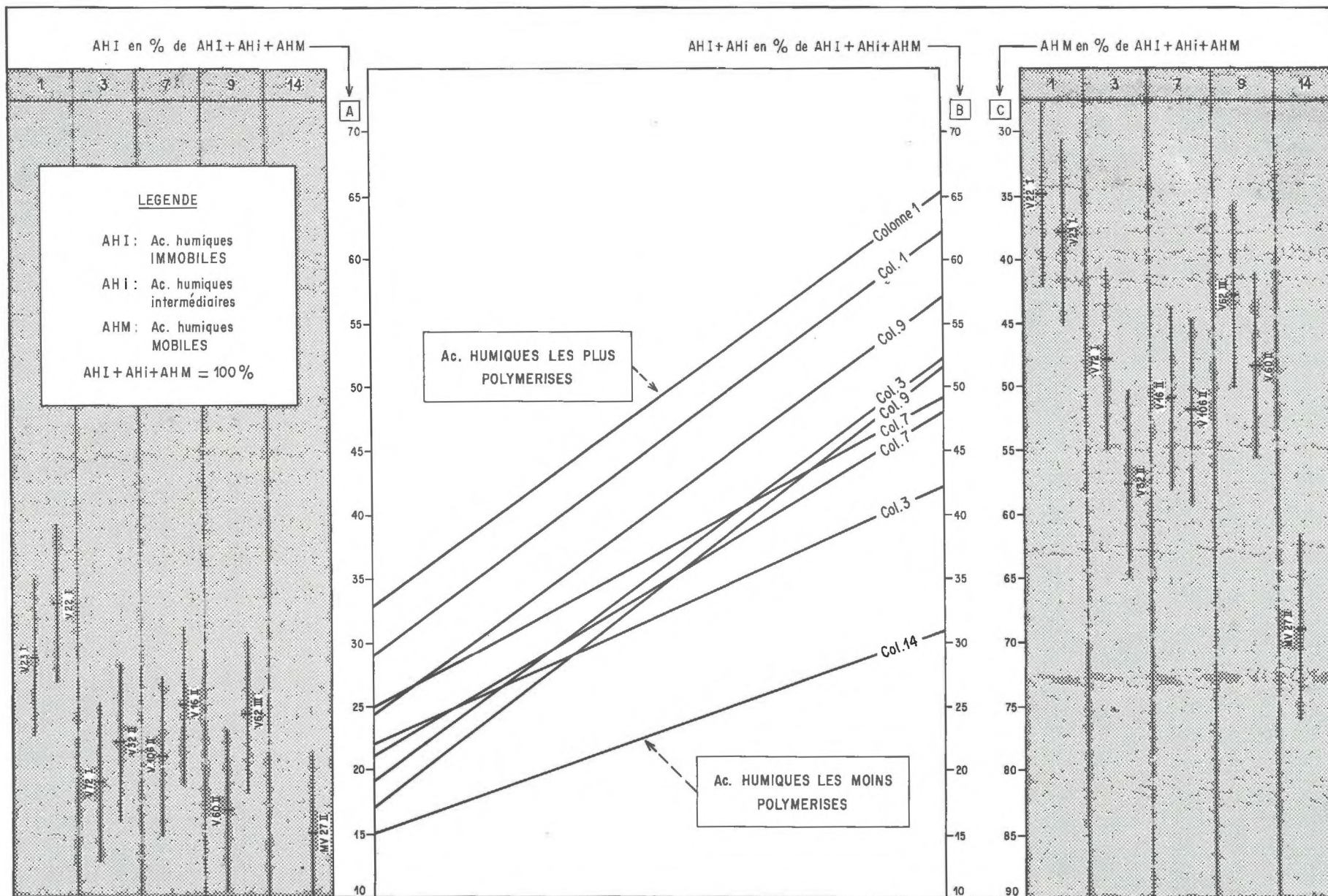


Figure 34 - Fractionnement des acides humiques par électrophorèse. Fractions densimétriques légères. Extraction I.

le calcium, en grande abondance, jouerait un rôle important dans le complexe organo-minéral. La matière organique dans ces sols serait celle de sols calcaires ou de rendzines. On arrive là à des conclusions, ou plutôt à des hypothèses, à peu près semblables, à celles proposées dans un chapitre antérieur, concernant la brunification actuelle des sols rouges méditerranéens. Un rôle important dans ces sols semble être joué par le calcium, qui persiste en abondance dans les horizons de surface.

En définitive, l'importance de l'humine n'a pas permis de distinguer les types de sols examinés à travers la séquence. Par contre, l'extraction fractionnée apporte des renseignements précieux. Nous avons essayé, dans ce paragraphe, d'expliquer les résultats, en les replaçant dans l'ensemble des données obtenues dans ce travail. Le problème de la matière organique dans ces sols est complexe et ce travail n'a souvent permis que de dégager des hypothèses ; il conviendra de les vérifier par des recherches ultérieures.

5.5 - COMPORTEMENT DES ACIDES HUMIQUES A L'ELECTROPHORESE

La méthode utilisée a été proposée par JACQUIN (1961), puis reprise par DUCHAUFOUR et JACQUIN (1963 ; 1966). Afin de raccourcir la durée des manipulations, seuls les acides humiques des extraits I et II ont été soumis à l'électrophorèse. Ils sont précipités, par addition aux composés humiques I et II, de HCl concentré, jusqu'à pH 1. Après floculation, ils sont isolés par centrifugation avec deux lavages par HCl N/10, puis un troisième, par HCl N/100. Ils sont ensuite, avant électrophorèse, redissous dans un minimum de NaOH N. L'électrophorèse est effectuée sur papier ARCHE 302, en milieu tamponné à pH 7,4 et sous une tension de 7 volts/cm, pendant 3 heures. Elle est réalisée en quatre répétitions par échantillon d'acides humiques. Ceci a permis le calcul d'erreur, de la même manière que précédemment.

Les phorégrammes sont divisés en trois parties. Les trois fractions obtenues sont appelées : acides humiques immobiles : AHI, acides humiques intermédiaires : AHi et enfin, acides humiques mobiles : AHM. Ces abréviations seront utilisées dans la suite de ce paragraphe. Le schéma du fractionnement par électrophorèse est représenté dans la figure 30, page 145 .

Les résultats sont exposés dans quatre figures. Les deux premières : 34 et 35, correspondent aux extraits I et II des fractions légères. Les deux autres : 36 et 37, à ceux des fractions lourdes. Ces figures sont construites de la manière suivante : les trois fractions obtenues à l'électrophorèse sont exprimées sous forme cumulative. Prenons l'exemple de la figure 34. Elle est constituée de deux parties : l'une à droite, l'autre à gauche ; dans chacune d'elles, sont représentées les colonnes 1,3, 7, 9 et 14, dont les numéros ont la même

signification que dans les figures antérieures. Il s'agit ici des fractions densimétriques légères ; elles sont sur fond gris foncé. On a : $AHI + AHi + AHM = 100\%$. La partie gauche et son échelle A correspondent à I en % de $AHI + AHi + AHM$. Dans la partie droite, deux échelles A et B sont représentées : B exprime $AHI + AHi$ en % de $AHI + AHi + AHM$; C est le complément de la précédente par rapport à 100 % et correspond à AHM en % de $AHI + AHi + AHM$. Cette dernière est lue du haut en bas ; les deux précédentes sont lues du bas en haut. Les droites au centre de la figure sont les "courbes" cumulatives. Les acides humiques les plus polymérisés ont leur "courbe" en haut de la figure. Ce sont ceux, qui ont le maximum de AHI (échelle A), le maximum de $AHI + AHi$ (B), et le minimum de AHM (C). Les acides humiques les moins polymérisés ont leur "courbe" cumulative en bas de la figure.

Examinons donc d'abord les résultats concernant les fractions densimétriques légères (figure 34, acides humiques de l'extrait I ; figure 35, extrait II). Une première remarque concerne les erreurs. La manière de les calculer a déjà été exposée précédemment. On constate, que les intervalles de confiance sont grands, en particulier, en ce qui concerne l'électrophorèse des acides humiques de l'extrait II. Ils sont plus grands, que ceux obtenus à l'extraction fractionnée. Les erreurs, relativement élevées dans cette technique de l'électrophorèse, rendent l'interprétation difficile. Comme pour l'extraction fractionnée, deux types de fractions légères semblent se distinguer des autres. Il s'agit d'abord des colonnes 1 (figure 34 et 35). Elles correspondent aux fractions légères des sols litho-calciques à mull-moder. Les acides humiques des extraits I et II sont plus polymérisés, que dans les autres fractions légères. De même, les colonnes 14 se distinguent des autres parce qu'elles contiennent des composés humiques peu polymérisés. Il s'agit ici de la fraction légère du xéromoder, sous Chêne vert.

Les résultats, concernant les fractions lourdes, sont représentés dans les figures 36 pour E.I et 37 pour E.II. Ils sont, exprimés sous forme cumulative, de la même manière que précédemment. La seule différence ici, est que les "courbes cumulatives" ne sont plus représentées. Elles étaient trop nombreuses. La lecture des résultats est faite, également comme pour les figures précédentes, sur les échelles A, B, C. Les acides humiques les plus polymérisés sont en haut des colonnes ; les moins polymérisés sont en bas.

Ici, comme pour les fractions légères, les intervalles de confiance relativement grands, rendent l'interprétation difficile. Examinons les types d'humus, qui se sont distingués lors de l'extraction fractionnée.

Le premier groupe discerné était celui des horizons (B) de sols bruns calciques, sous hêtraie et sous pessière. Il s'agit de les comparer aux horizons A_1 correspondants. Dans les premiers,

les composés humiques étaient plus facilement extractibles, que dans les seconds. Comparons donc, dans les figures 36 et 37, la colonne 6 (horizon (B)) à la 5 (A_1) et la colonne 10 (horizons (B)) à la 9 (A_1). On constate, que les acides humiques des (B) ont une légère tendance, à être plus polymérisés, que ceux des A_1 . Elle se manifeste à l'extrait I (figure 36) et II (figure 37). Mais cette différence n'est pas significative, puisque les intervalles de confiance se recouvrent. Le fractionnement par électrophorèse n'apporte, dans ce cas, pas de renseignement supplémentaire.

Le deuxième type d'humus distingué, lors de l'extraction fractionnée, était celui de la colonne 4 ; c'est le mull des sols lithocalciques à moder, situé sous l'horizon A_0 . Il est activement percolé de composés organiques, issus de l'humus brut. Il est saturé à 100 %, quel que soit T ; il est appauvri en fer et ses composés humiques se sont avérés facilement extractibles.

L'échantillon V 32 IV avait particulièrement attiré l'attention. On constate ici, que ces acides humiques, en particulier ceux de l'extrait I, sont relativement peu polymérisés. Dans les figures 36 et 37, d'autres échantillons ont un comportement identique à l'électrophorèse : les numéros V 141 II et V 88 II de la colonne 5, et V 62 III de la colonne 9 ; il s'agit, dans tous ces cas, de mulls sous litières acides ou sous moders. Les acides humiques qui en proviennent sont peu polymérisés. L'explication possible de cette observation est basée sur la biodégradation. Les composés humiques les moins polymérisés sont sous les litières acides ou sous les A_0 ; ils sont aussi les moins biodégradés, puisque le C/N de ces mulls reste relativement élevé. Il s'agit là d'une interprétation.

Les colonnes 1 et 2 constituent un autre type d'humus distingué, lors de l'extraction fractionnée. C'est la fraction lourde des mulls-moders sous les pelouses alpines et pseudoalpines. Ce type d'humus a des caractères originaux, à travers la plupart des paramètres examinés dans ce chapitre. L'examen des figures 36 et 37 montre, que la proportion des acides humiques intermédiaires est particulièrement importante. C'est le seul cas observé, parmi tous les sols étudiés dans ce travail. En effet, on constate que pour E.I (figure 36) et E.II (figure 37), AHI est faible (échelle A) ; AHI + AHi (échelle B) est par contre élevé et AHM est également faible (C). L'importance des produits intermédiaires dans ces mulls-moders n'est pas explicable, avec les données actuelles. Ces types d'humus apparaissant, comme très particuliers. C'est l'absence d'argiles, ou sa présence en quantité insuffisante pour former un mull, sous une végétation non génératrice d'humus brut, qui est probablement à l'origine des caractères propres de ces mulls-moders.

Il reste à expliquer le point le plus important de ces figures 36 et 37. Il concerne les fractions lourdes des mulls soumis aux conditions méditerranéennes. Ils sont tous très polymérisés. Même en tenant compte des erreurs importantes, inévitables dans cette technique, la

différence entre ces mullis et ceux examinés précédemment apparaît comme significative. Examinons donc les colonnes 12, 13, 15, 16 ; 12 et 13 correspondent à la série du Chêne pubescent, 15 et 16 à celle du Chêne vert ; 12 et 15 sont sous forêts et 13 et 16 sont sous pelouses de dégradation. Pour E.I, représenté dans la figure 36, AHI (à gauche, colonne A) est plus important que dans les autres types de sols ; AHM (à droite et colonne C) devient de moins en moins abondant, du Chêne pubescent, au Chêne vert. Dans la figure 37, qui correspond à E.II, AHI est plus variable, en particulier il est plus élevé sous Chêne pubescent que sous Chêne vert ; AHM par contre est très faible : partout les valeurs oscillent entre 0 et 5 %. Comment expliquer le haut degré de polymérisation des acides humiques, dans les mullis soumis aux conditions méditerranéennes ? Il convient de se rappeler, que les composés humiques dans ces types d'humus apparaissent comme extractibles, en quantité relativement importante, dès E.I et E.II et qu'une illuviation de composés organiques, complexés ou liés au fer et au calcium, est ici peu probable. C'est un exemple de composés relativement bien extractibles, mais qui apparaissent néanmoins fortement polymérisés à l'électrophorèse. Deux explications sont possibles. L'une est d'origine climatique : la polymérisation est favorisée par l'alternance de saisons particulièrement sèches avec des saisons humides. Une autre explication est d'ordre biologique : les composés organiques, encore peu polymérisés, disparaissent rapidement sous le Chêne vert ou le Chêne pubescent. Ils sont plus vite minéralisés ou humifiés, que sous la pessière ou la hêtraie, parce que les litières sont ici moins acides et les conditions bioclimatiques plus favorables à l'activité micro-biologique. Il s'agit là de deux hypothèses, qui sont proposées en vue d'expliquer le haut degré de polymérisation des acides humiques dans les sols fersiallitiques à réserve calcique. C'est un caractère original de ces sols du midi de la France.

5.6 - CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence un certain nombre de faits ou de proposer un certain nombre d'hypothèses, concernant la matière organique des sols développés sur calcaires compacts et il convient maintenant d'en faire une synthèse. Cinq types de matière organique sont distingués.

LES HORIZONS Ao

Ils se rencontrent sous toutes les séries de végétation. Ils sont rares et peu épais, sous les pelouses alpines et pseudoalpines. Leurs caractères sont alors particuliers et seront discutés en même temps que ceux des mullis-moders qu'ils surmontent. Les horizons Ao sont fréquents sous la pessière et la hêtraie ; leurs conditions de formation ont été discutées dans les chapitres précédents. Ils sont désaturés et les valeurs de S/T très variables ne permettent pas

de distinguer d'une manière significative, ceux qui sont sous pessière, de ceux qui sont sous la hêtraie mésophile. Il en est de même des paramètres concernant la matière organique examinés dans ce chapitre. Leurs caractères ne varient pas en fonction des types de végétation. La fraction densimétrique légère est bien sûr importante. Elle représente de 80 à 95 % du carbone total. Le carbone contenu dans 100 grammes de fraction légère varie entre 30 et 45 gr. La matière organique fraîche dans ces fractions est importante, c'est-à-dire que le carbone extrait est peu abondant. En outre, une néoformation des composés humiques, par la soude, est probable en E.III ; elle intervient peut-être dès l'extrait II. En effet, à l'électrophorèse, les acides humiques mobiles (AH²) sont encore abondants en E.II.

Les xéromoders, sous le Chêne pubescent et le Chêne vert, sont beaucoup plus rares ; ils se distinguent des précédents, par un certain nombre de caractères. Ils sont moins épais et dépassent rarement 3 cm. Leur complexe absorbant est davantage saturé en calcium. Un seul échantillon de xéromoder a été étudié ici. Il provient de la série du Chêne vert. Il est différent des moders, d'abord lors de la séparation densimétrique : les fractions légères sont ici moins abondantes ; ceci est normal dans ces horizons holorganiques moins épais. Ensuite, à l'extraction fractionnée, le carbone obtenu en E.III est faible, le caractère xéromorphe des feuilles de Chêne vert en est peut être responsable. Les acides humiques de E.I sont plus mobiles à l'électrophorèse, que dans les autres humus bruts. Ce caractère distinctif n'a pas pu être expliqué.

LES MULLS MODERS

Les mulls-moders, sous les pelouses pseudoalpines et alpines constituent un autre type d'humus. Ils ont des caractères très originaux, dont l'interprétation ne mène souvent qu'à des hypothèses. Ils se développent en absence d'argiles, indispensables à la formation du mull ou en présence d'une quantité trop faible. Dans ces conditions, on assisterait, sous forêts (pessière, hêtraie), à l'accumulation de moders. Or, la végétation des pelouses alpines ou pseudoalpines, herbacée, neutrophile ou basiphile n'est pas génératrice d'humus brut. C'est là, la cause de l'originalité de ces mulls-moders. Celle-ci se manifeste dans la plupart des caractères examinés. Commençons par la séparation densimétrique : la structure de ces horizons est particulière, pourtant les fractions densimétriques légères sont peu importantes. Elles augmentent en surface, mais on assiste rarement à la différenciation d'un horizon Ao. S'il existe, il est peu épais. Les caractères chimiques de la fraction légère restent plus proches de ceux de la fraction lourde, que de la fraction légère des moders précédents. Dans les autres types d'humus examinés, les deux parties densimétriques avaient des caractères nettement différents : la séparation était suffisamment conforme à la réalité. Cela semble moins évident pour les mulls-moders. La densité de 1,75 utilisée sépare des fractions, dont les caractères restent assez proches.

Les rapports C/N constituent un autre paramètre, par lesquels les mulls-moders se distinguent. Ils sont bas, même dans des horizons superficiels, où la fraction légère est plus importante. C'est un cas général ; sous les pelouses, les C/N sont plus faibles que sous forêts. Ce fait est observé sous toutes les séries de végétation. La nature de la végétation herbacée en est responsable. Mais ici, les valeurs sont inférieures à 10. Ceci n'est jamais observé ailleurs dans la séquence. On attribue aux argiles un rôle protecteur des composés humiques, vis-à-vis de la dégradation microbienne (PINCK et ALLISON 1951, in DUCHAUFOR, 1970). Mais l'effet rhizosphère et la nature basiphile ou neutrophile de la végétation jouent aussi un rôle important.

Ces sols sont originaux aussi par leurs composés humiques difficilement extractibles, puisqu'une quantité importante du carbone n'est dissoute que par la soude. Or ceci est mal expliqué, à l'état actuel de nos connaissances. Nous avons proposé l'hypothèse suivante : la matière organique forme des complexes très stables avec le fer. Dans ces milieux saturés et à C/N bas, ceux-ci sont immobilisés et difficilement extractibles.

Le comportement des acides humiques de ces sols à l'électrophorèse est également particulier. La proportion des acides humiques intermédiaires est ici importante. C'est le seul cas rencontré. En définitive, la matière organique dans ces types d'humus, ses liaisons avec le fer, son importance dans l'élimination des ions calciques, posent des problèmes qui ne sont pas résolus.

LES MULLS SOUS A₀ ET SOUS LITIÈRES ACIDES

Les autres types de matière organique rencontrés sont tous des mulls formés en présence d'argiles. Parmi eux, celui situé sous les horizons A₀ dans les sols litho-calciques à moder, a aussi des caractères particuliers, mais plus facilement explicables, que précédemment. Rappelons que ce mull est énergiquement percolé par les solutions organiques qui proviennent de l'humus brut. Les ions calciques, éliminés constamment, sont remplacés, à partir de ceux, mis en solution à la surface du squelette. Les composés du fer sont ici entraînés hors du profil par les solutions complexantes, issues de l'humus brut. Les formes, sous lesquelles migre le calcium, ne sont pas connues. Mais il est probable que les composés solubles, qui proviennent de l'horizon A₀, jouent un rôle plus important que sous les pelouses. Ceux, qui sont insolubilisés dans le mull, restent relativement bien extractibles (E.I et E.II sont importants). Selon l'interprétation proposée dans ce chapitre, il s'agit là de composés liés essentiellement par le calcium, une partie importante du fer étant éliminée. A l'électrophorèse, ces composés s'avèrent relativement peu polymérisés.

Les mulls sous horizons A₀ des autres types de sols, tels que beaucoup de sols humiques carbonatés, ou de sols bruns calciques humifères, ont des caractères semblables à ceux qui viennent d'être examinés.

De même, les horizons A_1 des sols bruns calciques modaux, sous pessière et même sous hêtraie mésophile, ont des caractères proches. Ils ne sont plus sous A_0 , mais sous litière acide. L'élimination du fer et de l'aluminium des horizons A_1 n'a pas lieu, ou elle reste réduite et la matière organique s'avère, de ce fait, plus difficilement extractible (importance de E.III). Mais elle est aussi relativement peu polymérisée. Ceci est également interprété ici comme le signe de la présence en A_1 de composés non encore stabilisés par la biodégradation.

LA MATIÈRE ORGANIQUE DES HORIZONS (B) CALCIQUES OU CALCAIRES

L'étude de la faible quantité de matière organique, qui se trouve dans les horizons (B) des sols bruns calciques était intéressante puisque une illuviation de composés organiques y était soupçonnée. On a, là, deux séries de facteurs qui interviennent. Les premiers sont les facteurs actifs de pédogénèse : la présence d'une litière acide ou d'un A_0 qui, sous les conditions climatiques humides, libère des composés humiques agressifs. Ce sont ces mêmes facteurs, qui interviennent dans les mécanismes expliqués ci-dessus. Le deuxième groupe est constitué de facteurs passifs : c'est la présence d'horizons (B) calcaires ; on passe d'un pH (H_2O) de 5 à 6,5 en A_0 ou en A_1 à des valeurs de 7,5 à 8 en (B). Ces milieux provoquent l'immobilisation des composés organiques illuviés. Ils sont particulièrement fréquents dans les sols bruns calciques à horizon (B) calcaire. Sous les mullis des sols litho-calciques à moder, ces (B) n'existent pas encore et les composés humiques mobiles sont probablement éliminés le long des parois du karst. Il en est de même pour les sols humiques carbonatés.

L'illuviation de la matière organique, dans les sols bruns calciques, se manifeste par un certain nombre de paramètres. Les rapports acides humiques/acides fulviques sont plus faibles en (B) qu'en A_1 . Ceci n'a pas été observé dans les mullis situés à la base des sols litho-calciques à moder. Par ailleurs, on constate que les composés humiques des horizons (B) calciques ou calcaires sont plus facilement extractibles que ceux des horizons A_1 . Or, les chapitres précédents nous enseignent que ces (B) sont plus calciques que les horizons A_1 , ils sont souvent calcaires ; par ailleurs, l'illuviation du fer et de l'aluminium est nulle à faible ; mais les rapports aluminium libre/aluminium total et fer libre/fer total sont plus élevés en A_1 qu'en (B). Ceci amène alors l'hypothèse d'une illuviation dans les sols bruns calciques de composés humiques essentiellement liés au calcium. Ces composés sont immobilisés dans les milieux à pH plus élevés des horizons (B). Ils sont là protégés par les argiles et le calcium mais progressivement biodégradés.

DES SOLS FERIALLITIQUES

Le dernier type de mull est celui qui se trouve dans les sols feriallitiques à réserve calcique. Il est sous les séries du Chêne vert et du Chêne pubescent. Le concernant trois caractères essentiels sont à retenir. D'une part, sous forêt de Chêne vert, la fraction densimétrique légère est relativement abondante ; c'est la lenteur de la décomposition de la litière, qui en est responsable. Des débris de feuilles, à caractères xéromorphes, sont mélangés au mull par la faune fouis-seuse ; leur décomposition est lente parce qu'ils sont coriaces et parce que le milieu est sec. La décomposition lente de la litière détermine parfois en surface la formation d'un xéromoder.

Le deuxième caractère de ces mulls est important ; il concerne la relative facilité avec laquelle les composés humiques sont extraits, dès le traitement au pyrophosphate. C'est la présence des ions calciques en grande abondance, dès les horizons de surface, qui en serait responsable. En particulier, leur rôle serait prépondérant sur celui du fer. On constate, par ailleurs, que les rapports fer libre/fer total et aluminium libre/aluminium total sont dans ces sols plus faibles, que dans les horizons A₁ sous la pessière ou sous la hêtraie et dont les composés humiques sont plus difficilement extractibles. Selon cette interprétation, les sols actuels du midi de la France seraient donc du type sols bruns calciques ou très calciques dont les composés humiques, essentiellement liés par le calcium, sont relativement vite extractibles. Cette conclusion rejoint celle qui a été dégagée, lors de l'examen de la dynamique des ions calcium à travers ces sols. Les complexes absorbants sont saturés et les pH basiques, comme dans les sols bruns calcaires. L'absence de calcaire, en grande abondance dans la terre fine, est due aux paléopédogénèses et au caractère compact de la roche-mère.

Le troisième caractère original de ces mulls réside dans le haut degré de polymérisation des acides humiques, vérifié par l'électrophorèse. Deux explications sont proposées : l'alternance fréquente, de phases humides, avec des phases très sèches, qui favorise la polymérisation. L'autre explication est d'ordre microbiologique : nous avons vu précédemment, que les feuilles se décomposent lentement ; mais les composés humiques solubles, qui en proviennent pendant les saisons humides plus chaudes qu'en altitude, sont rapidement biodégradés. Les sucres, ou d'autres composés organiques mobiles, à poids moléculaire faible, sont au printemps ou en automne rapidement minéralisés ou immobilisés, dans le complexe organo-minéral stable. Ceci a lieu dès les horizons de surface. Dans l'entraînement du calcium et à plus forte raison du fer, le rôle de la matière organique est ici probablement très réduit.

MATIERE ORGANIQUE ET DEGRADATION DE LA VEGETATION

Avant de clore ce chapitre, un dernier point mérite d'être signalé ; il concerne la matière organique des pelouses de dégradation. Celle-ci se distingue de celle des sols forestiers, par un seul caractère important : le C/N est plus bas, sous pelouses que sous forêts ; cette différence se traduit aussi, par une moindre quantité de fractions légères dans les sols de pelouses. Mais il convient de retenir, que les méthodes utilisées ici n'ont pas mis en évidence de différence significative, en ce qui concerne la fraction lourde : ses caractères sont identiques sous les deux types de végétation.

En définitive, l'étude des humus bruts apporte peu de données nouvelles. Le mull-modéré des pelouses pseudoalpines a des caractères tout à fait particuliers. C'est la comparaison des mulls, qui se trouvent à travers la séquence sous des conditions très variables, qui est la plus instructive. Elle a permis de mettre en évidence, du nord au sud, des types d'humus de moins en moins actifs, dans l'élimination du fer et de l'aluminium, puis du calcium, et dans lesquels la biodégradation des composés mobiles est de plus en plus rapide. Mais l'interprétation des résultats, qui ont été exposés ici, repose sur un certain nombre d'hypothèses. Elles concernent en particulier les liaisons organo-minérales, plus ou moins énergiques, selon qu'il s'agisse de liaisons par le calcium, le fer et l'aluminium. Elles concernent aussi la polymérisation plus ou moins importante des acides humiques, suivant leur comportement à l'électrophorèse. Enfin, il a été admis, que les composés, dont le C/N reste élevé, c'est-à-dire non stabilisés par la biodégradation, sont moins polymérisés que ceux de mulls où le C/N est bas. Ce sont là des hypothèses admises dans l'état actuel des recherches. Elles font l'objet des travaux d'un certain nombre de chercheurs.

CHAPITRE VI

6 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS SUR ROCHES-MÈRES CALCAIRES DURES ET PURES

L'analyse des minéraux argileux, par diffraction des rayons X, a été réalisée au Laboratoire de Géologie et de Paléontologie de l'Université de Strasbourg, sur une vingtaine de profils, parmi les sols sur roches-mères calcaires compactes. Les résultats sont exposés en deux parties. La première concerne les sols de montagne, la seconde les sols fersiallitiques.

6.1 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS DE MONTAGNE

Les données, concernant cinq profils, choisis parmi les sols du Vercors, sont présentées dans le tableau 7. Il s'agit de deux sols lithocalciques humifères à mull-moder, de deux sols bruns calciques et d'un brun calcaire.

Examinons d'abord les minéraux argileux dans les roches-mères C ou dans les roches R qui portent les sols. Ce sont les argiles résiduelles, obtenues après dissolution du CO_2 . Trois types d'argiles sont observés. La kaolinite-chlorite *) est généralement présente. Mais elle n'est jamais en forte proportion. Les minéraux prédominants sont, soit un édifice interstratifié, gonflant du type (10-14 M) - M proche de la montmorillonite, soit de l'illite ; celle-ci est ouverte dans l'horizon R du profil 104 (tableau 7).

Quel que soit le minéral présent, dans la roche-mère ; illite, édifices gonflants ou un mélange des deux, on observe à travers les profils une individualisation de vermiculite. La vermiculitisation se fait, par l'intermédiaire d'interstratifiés (14V - 14M) et I (10 - 14V) - V. Examinons le tableau 7 :

- Les sols les moins évolués de la série, sont les sols lithocalciques humifères à mull-moder. Le stade vermiculite n'est pas atteint. L'altération des argiles s'arrête au stade interstratifié non gonflant I-(10-14V)-V.

- Parmi les cinq profils examinés, c'est le sol brun calcique V 70, provenant de la pessière, qui présente le maximum d'évolution : c'est ici aussi que le complexe absorbant est partiellement désaturé. La vermiculite est présente en forte proportion, dès l'horizon (B).

*) La kaolinite et la chlorite donnent toutes les deux un pic à 7 Å. Dans la suite de ce travail, le terme "kaolinite-chlorite" ou dans les tableaux le sigle "Kc" désignent un mélange de kaolinite et de chlorite, dans lequel la chlorite est présente sous forme de traces.

- Dans le sol brun calcique V58, sous hêtraie mésophile, la vermiculite est encore accompagnée d'interstratifiés I-(10-14V)-V. Ce sol est aussi moins acide, que le précédent, son complexe reste saturé.

- Enfin, dans le sol brun calcaire V55, les argiles varient en fonction du taux de CO_2Ca (3ème colonne). De la roche-mère C, à l'horizon (B) encore très calcaire (58 %), les minéraux ne varient guère. En A, presque décarbonaté, par contre, apparaît déjà une forte proportion de vermiculite. L'illite et les édifices (10-14M)-M ont disparus.

En définitive, on assiste donc, à travers ces sols de montagne sur calcaires compacts, à une évolution des minéraux argileux, qui se superpose assez fidèlement à l'évolution morphologique et à celle des autres paramètres étudiés précédemment. L'altération gagne tout le profil jusqu'en (B), dans le cas du sol brun calcique sous pessière ; la réserve calcique n'est là plus capable de maintenir le complexe à l'état saturé. Elle reste très superficielle dans le sol brun calcaire. Elle est intermédiaire, à travers les autres types de sols.

Les argiles de ces sols de montagne ne seront pas examinées davantage ici. Des données complémentaires seront apportées ultérieurement, dans le chapitre consacré aux sols de montagne sur calcaires tendres.

6.2 - LES MINÉRAUX ARGILEUX DANS LES SOLS FERRIALITQUES A RÉSERVE CALCIQUE

Les résultats présentés dans le tableau 8, intéressent les sols ferriallitiques à réserve calcique. L'interprétation des données est fort simple. A travers les quatre profils du tableau, n'apparaît aucune évolution. Il convient d'abord de constater, que les argiles des horizons C n'ont pas été présentées, ici. En effet, comme il a été dit précédemment, la roche encaissante R n'est probablement pas l'unique matériel, qui a donné origine à ces sols. Le résidu de dissolution de deux échantillons de calcaire compact du Kimméridgien-Portlandien, la roche encaissante des profils L 60 et L 61 du tableau 8, a cependant été analysé. Dans les deux cas, une illite ouverte domine sur un mélange kaolinite-chlorite *) où la chlorite est peu abondante.

Les quatre profils du tableau proviennent tous des Garrigues languedociennes. L'illite prédomine partout sur un mélange de kaolinite-chlorite *). Cette composition reste invariable, à travers tous les horizons ; aucune évolution n'est observée. En particulier, de l'horizon (B) rouge, au (B) ocre, puis hydromorphe, la composition minéralogique reste identique.

En définitive, on retrouve dans ces sols ferriallitiques les mêmes minéraux argileux, que dans la roche encaissante. Même les proportions, entre illite et kaolinite - chlorite, sont à peu près respectées.

*) Voir note page 173.

TABLEAU 7 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS DE MONTAGNE SUR ROCHES-MERES CALCAIRES DURES ET PURES

1) SOLS HUMO-CALCIQUES A MULL-MODER

PROFIL V 95 Sous pelouse pseudoalpine

HORIZONS	PROFONDEURS	S en % de T	Al libre en % de Al total	KAOLINITE -CHLORITE	ILLITE	I-(10-14V)-V	VERMICULITE	14V-14M	(10-14M)-M
A ₀ /A ₁₁	0-30	saturé	10,6 %	30 %		70 %			
A ₀ /A ₁₂	30-40	saturé	9,4 %	30 %		70 %			
A ₀ /A ₁₃	40-70	saturé	6,7 %	20 %	30 %				50 %
R	70 ...			tr					100 %

PROFIL V 104 Sous pelouse pseudoalpine

A ₀ /A ₁₁	5-20	saturé	12,0 %	30 %		70 %			
A ₀ /A ₁₂	20-40	saturé	11,4 %	30 %		70 %			
A ₀ /A ₁₃	40-50	saturé	7,9 %	20 %	tr			80 %	
R	50 ...			20 %	80 % ouverte				

2) SOLS BRUNS CALCIQUES

PROFIL V 58 Sous hêtraie mésophile

A ₁₁	0-25	saturé	9,4	20 %		10 %	70 %		
A ₁₂	25-60	saturé		20 %		20 %	60 %		
(B)	60-100	saturé	7,7	20 %		10 %	50 %	20 %	

PROFIL V 70 Sous pessière

A ₁₁	2-10	78 %	3,0 %	20 %	tr		80 %		
A ₁₂	10-50	85 %	8,8 %	20 %	tr		80 %		
(B)	50-70	78 %	10,2 %	20 %	tr		80 %		
R	70...			10 %	40 %				50 %

3) SOL BRUN CALCAIRE

PROFIL V 55 Sous hêtraie mésophile

HORIZONS	PROFONDEURS	CO ₂ Ca en % de terre fine	Al libre en % de Al total	KAOLINITE -CHLORITE	ILLITE	I-(10-14V)-V	VERMICULITE	14V-14M	(10-14M)-M
A ₁	0-20	1,3 %	8,7 %	20 %			60 %	20 %	
(B)	50-70	58 %	5,9 %	20 %	10 %				70 %
C	70 ...			10 %	30 %				60 %

TABLEAU 3 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS FERSIALLITIQUES A RESERVE CALCIQUE

PROFIL L 60

HORIZONS	PROFONDEURS en cm	S en % de T	Al libre en % de Al total	ILLITE	KAOLINITE CHLORITE *)
A ₁	10 - 35	saturé	4,9 %	60 %	40 %
A ₃	35 -100	saturé	4,4 %	70 %	30 %
(B) rouge	100 -300	saturé	4,1 %	70 %	30 % K
(B) ocre	300 -500	saturé	4,7 %	70 %	30 % K

PROFIL L 61

(B) rouge	130 -300	saturé	4,8 %	60 %	40 %
(B) ocre	600 -700	saturé	3,8 %	60 %	40 %
(B)bariolé	900 -1000	saturé	4,4 %	60 %	40 %

PROFIL L 21

A ₁	2 - 10	saturé	4,4 %	60 %	40 %
(B) rouge	40 - 60	saturé	3,7 %	60 %	40 %

PROFIL L 13

A ₁	2 - 10	saturé	4,0 %	80 %	20 %
(B) rouge	30 - 60	saturé	2,4 %	80 %	20 %

*) Voir note page 173.

Mais ce n'est pas là une condition suffisante pour en déduire, que ces sols sont formés à partir du résidu de dissolution du calcaire. Par ailleurs, comme l'ont montré de nombreux auteurs et en particulier GAL (1966), CARVALHO VASCONCELLOS (1967), DACHARY (1967), RAVIKOVITCH (1967), TELXEIRA BESSA (1967) et PAQUET (1969), les minéraux dans ces sols sont très souvent hérités. Les sols fersiallitiques à réserve calcique du midi de la France constituent un milieu peu lessivant et peu hydrolysant, vis-à-vis des argiles.

6.3 - CONCLUSION

La présence de réserve calcique protège les minéraux argileux. Elle est très efficace dans les sols fersiallitiques du midi de la France. Lorsque son rôle de fournisseur d'ions Ca⁺⁺ est déficient, tel que dans les sols bruns calciques sous résineux en montagne, l'altération des minéraux entre en jeu. Mais celle-ci reste, malgré tout, assez ménagée

TROISIEME PARTIE

EVOLUTION DES SOLS

SUR LES AUTRES TYPES DE ROCHES MERES CALCAIRES

- SUR CALCAIRES SILICEUX
- SUR DOLOMIES
- SUR CALCAIRES TENDRES

1. EVOLUTION DES SOLS SUR ROCHES-MERES CALCAIRES SILICEUSES :
LES SOLS FERRIALITTIQUES SANS RESERVE CALCIQUE, DU MIDI DE
LA FRANCE
2. LES SOLS SUR DOLOMIES
3. PEDOGENESE SUR ROCHES-MERES CALCAIRES TENDRES : EVOLUTION
DES SOLS, A COMPLEXE ABSORBANT DESATURE

CHAPITRE I

1 - EVOLUTION DES SOLS SUR ROCHES-MÈRES CALCAIRES SILICEUSES : LES SOLS FERSIALLITQUES SANS RESERVE CALCIQUE DU MIDI DE LA FRANCE

L'évolution des sols sur roches-mères calcaires siliceuses n'a pas été étudiée, d'une manière systématique, à travers toute la séquence. En particulier en montagne, le choix des régions prospectées n'a pas été orienté par la présence de ce type de roche-mère. Seuls, ceux des karsts méditerranéens ont fait l'objet d'une prospection approfondie. L'objet de ce chapitre est d'abord, d'étudier le mode d'altération des calcaires siliceux et ensuite de comparer les sols fersiallitiques sans réserve calcique, à ceux avec réserve. Les deux types de sols, examinés dans le midi de la France, se trouvent en effet sur les mêmes surfaces karstiques. Ils ont été soumis à des phénomènes géomorphologiques identiques. Ils ont subi la même histoire paléoclimatique et enfin, ils sont sous des conditions actuelles semblables. Afin d'alléger le texte, les sols fersiallitiques sans réserve calcique seront appelés, plus simplement, "sols sans réserve calcique" et les autres : "avec réserve calcique". Les premiers correspondent aux sols rouges méditerranéens lessivés. La dénomination actuelle utilisée est due à la CPCS 1967.

1.1 - MODE D'ALTERATION DES CALCAIRES SILICEUX ET MORPHOLOGIE DES SOLS FERSIALLITQUES SANS RESERVE CALCIQUE

Les calcaires siliceux constituent des faciès plus ou moins épais, dans les calcaires jurassiques, crétacés et parfois tertiaires. Comme les calcaires durs et purs, ils sont généralement compacts et soumis à une altération essentiellement pelliculaire. Ils ont également résisté à l'érosion et maintenu, à travers les temps, des surfaces karstiques relativement stables. Ils ont permis la conservation de paléosols. Ce type de roche-mère se distingue des précédents, par l'importance du résidu insoluble non calcaire. Dans les calcaires durs et purs, le résidu est peu important et, malgré la longue décarbonatation, le calcaire subsiste, sous forme de réserve, jusque dans les horizons de surface. Cette réserve s'oppose au lessivage des sols fersiallitiques, à l'altération de ses argiles et maintient un complexe absorbant constamment saturé. Dans les calcaires siliceux, par contre, le résidu est abondant. Il est constitué de matériel colloïdal, comme précédemment, mais surtout d'une forte charge de chailles et de silex. A la suite de la décarbonatation, on assiste à son accumulation à la surface de la roche. Le karst est enterré sous une couche de matériel argileux à chailles ou à silex, sans réserve calcique et souvent acide. C'est l'absence de la réserve qui a orienté l'évolution du sol ; en effet, elle a permis le lessivage, une altération plus poussée des minéraux argileux et une désaturation du complexe absorbant.

Voici la description morphologique d'un sol fersiallitique sans réserve calcique.

Profil n° P.A. 59, commune de Montsalier dans les Monts du Vaucluse, C.L. x = 859,9 ; y = 201,3 ; altitude 910 m, carte IGH au 1/50 000, feuille de Sault de Vaucluse, sur calcaire siliceux, sous pelouse de dégradation.

Ask : 0 à 5 cm, couche de silex résiduels, absence de cailloux calcaires.

A₁ : 5 à 20 cm, texture sablo-limoneuse, structure polyédrique subanguleuse très friable à particulaire, couleur à l'état humide 10 YR 3/2, 60 % de silex, absence de cailloux calcaires, racines et radicelles très abondantes, passage progressif.

A₂ : 20 à 60 cm, texture sableuse, structure particulaire, très friable, couleur à l'état humide 10 YR 5/4, 70 % de silex, absence de cailloux calcaires, racines peu abondantes, passage relativement rapide.

B₂ : 60 - 150 cm, texture argileuse, structure polyédrique anguleuse moyenne à facettes brillantes, consistance dure à l'état sec ; couleur à l'état humide 2,5 YR 3/6, 70 % de silex, absence de cailloux calcaires, racines peu abondantes, passage progressif.

B₃ : 150 - 300 cm, texture argileuse, structure polyédrique anguleuse grossière, les facettes brillantes sont moins apparentes, consistance peu fragile à l'état sec, couleur à l'état humide 2,5 YR 5/6, 10 % de silex, racines peu abondantes, présence de gros blocs calcaires très corrodés avec pellicule de dissolution.

Les caractères morphologiques à retenir sont les suivants : l'horizon organique est du type mull ou moder ; il n'est jamais épais, en particulier sous forêt. Ses caractères seront discutés plus en détail dans la suite de ce chapitre. L'horizon A₂ est peu coloré ; sa structure est particulaire ; il est très squelettique ; son épaisseur est variable : de 30 cm à 1 m. Les horizons B sont rouges, avec parfois des taches ocre ; ils sont argileux. Le calcaire du karst enterré n'apparaît jamais dans les horizons A₁ ou A₂ ; il est parfois présent dès B₂ et, généralement, à partir des horizons B₃. Les parois du karst sont très corrodées, par la dissolution et les pellicules d'altération sont très manifestes, dans les horizons B₂ et B₃.

L'examen micromorphologique des horizons A₂, B₂ et B₃ confirme les données obtenues par l'analyse macromorphologique. L'illuviation des argiles est très intense en B₂ et décroît progressivement en B₃. A la base de l'horizon A₂, on observe parfois des lambeaux d'anciens B₂. Il s'agit là probablement, de la destruction d'anciens horizons illuviaux, par des entraînements obliques. Enfin, signalons aussi que, sur quelques lames d'horizons B₃ de sols très évolués, une illuviation secondaire (FEDOROFF, 1968) a été observée ; mais sur calcaires siliceux, ce sont

des cas exceptionnels. L'examen de ces lames minces a été réalisé au laboratoire de Géologie et de Pédologie de l'E.N.S.A. de GRIGNON. Ces sols fersiallitiques sont proches de ceux, étudiés par RUTTEN et al. (1963) et VIGNERON et al. (1966) ou par BORNAN (1969), sur les hautes terrasses silico-calcaires du Languedoc ou de la vallée du Rhône. Dans ces sols sans réserve calcique, la CPCS (1967) distingue les sous-groupes suivants : modal, légèrement hydromorphe, à caractères vertiques, très lessivé et enfin très lessivé et très hydromorphe.

1.2 - QUELQUES CARACTERES CHIMIQUES DE CES SOLS

Dans ce paragraphe, seront présentés rapidement les résultats concernant l'état du complexe absorbant, l'entraînement des argiles et du fer, l'altération des minéraux argileux et l'aluminium libre. L'étude de la matière organique fera l'objet d'un paragraphe particulier.

Le complexe absorbant de ces sols est partiellement désaturé : dans les horizons A_1 et A_2 , S/T varie entre 100 et 60 %. Des horizons B_2 à B_3 , le complexe est de plus en plus saturé, en particulier à la proximité de la roche-mère calcaire. L'importance des bases dans les horizons profonds est fonction de la présence ou de l'absence de squelette calcaire.

Le fait surprenant dans ces sols, c'est le degré relativement élevé du taux de saturation dans les horizons A_2 . Ceux-ci sont en effet, par ailleurs, très lessivés. C'est un caractère fréquent dans ces sols rouges méditerranéens lessivés ; le complexe absorbant reste proche de la saturation, même dans les horizons éluviaux.

L'entraînement des argiles et du fer est en effet important dans ces sols, comme le montre la figure 21 page 117. Les indices sont échelonnés entre 2 et 7. La nature du fer pose ici les mêmes problèmes que ceux qui ont déjà été examinés dans le chapitre consacré aux sols fersiallitiques à réserve calcique. La méthode DEB, qui détermine le rapport fer libre/fer total, ne permet pas de distinguer les horizons éluviaux des illuviaux. Les différences observées et données dans la figure 22 page 120, ne sont en effet pas significatives.

L'analyse minéralogique des argiles, par diffraction des rayons X, a été effectuée sur quatre profils de sols fersiallitiques sans réserve calcique. Les résultats de deux d'entre eux sont présentés dans le tableau 9. Dans ces deux profils très anciens, la roche-mère C n'est pas connue. La teneur en kaolinite ne dépasse jamais 30 à 40 %. Elle est subordonnée, par rapport aux édifices 10-14 A qui prédominent. Dans les horizons B illuviaux très colmatés, ces édifices 10-14 A sont essentiellement des interstratifiés gonflants de type I -(10-14 M) -M. Dans les horizons lessivés, ils sont plutôt du type I-(10-14 V) ; ils tendent vers la vermiculite, qui est nettement individualisée dans l'horizon A_2 du profil MV 59. L'interprétation en est la suivante : dans les sols rouges lessivés, les édifices micacés se transforment soit en argiles du type I - (10-14 M) - M dans les horizons B, soit en I - (10-14 V) - V, et même en vermiculite dans les horizons lessivés. Cette transformation consiste en un lessivage des ions interfoliaires. LAMOUREUX et al. (1967) et PAQUET (1969) étudient en détail les modalités de ces transformations dans ces types de sols. YAALON et al. (1966) signalent également

TABLEAU 9 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SOLS FERRIALLITIQUES SANS RESERVE CALCIQUE

PROFIL L 43

HORIZONS	PROFONDEURS en cm	S en % de T	Al libre en % de Al total	I-(10-14V)-V	VERMICULITE	14V - 14M	(10-14M)-M	I-(10-14V) (10-14C)	KAOLINITE CHLORITE
A ₁	2 - 7	86 %	4,5 %					70 %	30 %
A ₂	7 - 36	82 %	5,0 %				60 %		40 %
B ₂	36 - 100	84 %	3,3 %				70 %		30 %

PROFIL MV 59

A ₂	25 - 60	97 %	8,6 %		70 %				30 %
B ₂	60 - 170	49 %	3,5 %	70 %					30 %
B ₃	170 - 300	60 %	5,6 %	10 %	30 %	40 %			20 %

l'ouverture des feuillets de l'illite dans les sols rouges méditerranéens d'Israël. Alors que dans les sols fersiallitiques à réserve calcique, les argiles ne sont pas ou peu lessivées, ni hydrolisées, on observe dans les sols sans réserve calcique un lessivage intense et une altération par dégradation, mais celle-ci reste cependant ménagée.

Il convient aussi de remarquer, dans le tableau 9, les faibles valeurs du rapport Al libre/ Al total. C'est un caractère important, qui nous permettra de distinguer ces sols, des sols lessivés examinés dans un chapitre ultérieur sur roches-mères calcaires tendres, dans le Vercors.

1.3 - LA MATIERE ORGANIQUE

La matière organique dans les sols fersiallitiques, avec ou sans réserve calcique, a été étudiée par BOTTNER (1970).

1.31 - MORPHOLOGIE DU PROFIL ORGANIQUE - VALEURS CARACTERISTIQUES

Le profil organique se développe sur l'horizon A₂. Celui-ci est appauvri en argiles et en fer. Son complexe absorbant est partiellement désaturé. La présence d'un squelette siliceux abondant rend ces horizons très perméables et secs, pendant la saison sèche. Chacun de ces caractères différencie les milieux examinés ici, de ceux dans lesquels se développe le profil organique des sols fersiallitiques à réserve calcique.

Sous les forêts de Chêne pubescent et de Chêne vert, deux types de matière organique sont distingués.

- Dans les horizons A₂ qui ne sont pas trop appauvris en argile et en fer, ceux où le squelette siliceux n'est pas trop abondant, l'activité des lombricidés est encore possible. Il se développe un horizon organique du type mull. Celui-ci n'est jamais épais : de 2 à 7 cm ; il est peu coloré par la matière organique : 10 YR 3/2, 4/2. Il reste par contre très bien structuré en grumeaux très stables, extrêmement durs et façonnés par les vers de terre. Cet horizon est appelé cryptomull, parce qu'il est superficiel et que sa couleur reste relativement claire*).

- Dans les milieux très appauvris et très squelettiques. l'activité des lombricidés n'est plus possible. Il se forme alors un horizon A₀, également peu épais (2 à 5 cm), à structure feuilletée ou fibreuse. En raison de sa faible épaisseur et de ses valeurs de S/T relativement élevées, il sera appelé xéromoder.

*) Le cryptomull tel qu'il est présenté ici est généralement sous forêt. L'horizon organique, décrit à la page 179, est sous pelouse de dégradation ; il est plus épais à cause de la présence de racines de graminées. Il est aussi moins bien structuré, parce moins bien façonné par la faune du sol, qui est moins active sous pelouse que sous forêt. Au chapitre III de cette troisième partie, nous comparerons les caractères morphologiques de ce qui est ici appelé cryptomull, aux mulls acides

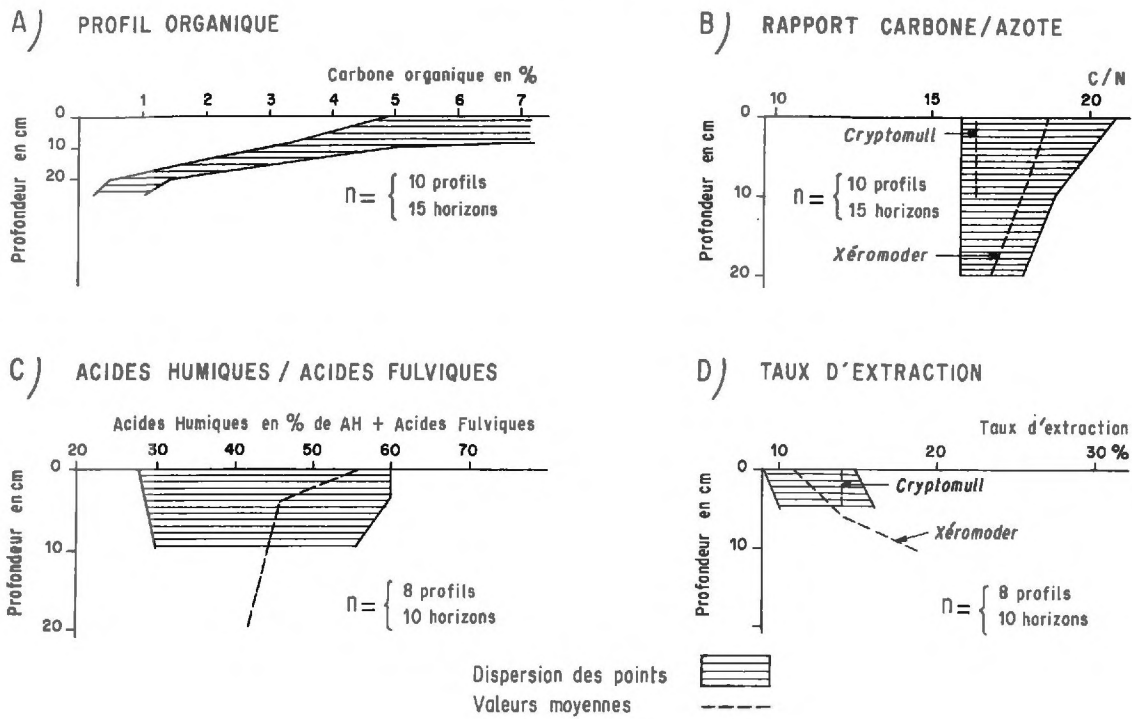


Figure 38 - Valeurs caractéristiques concernant la matière organique des sols fersiallitiques sans réserve calcique sous chêne vert.

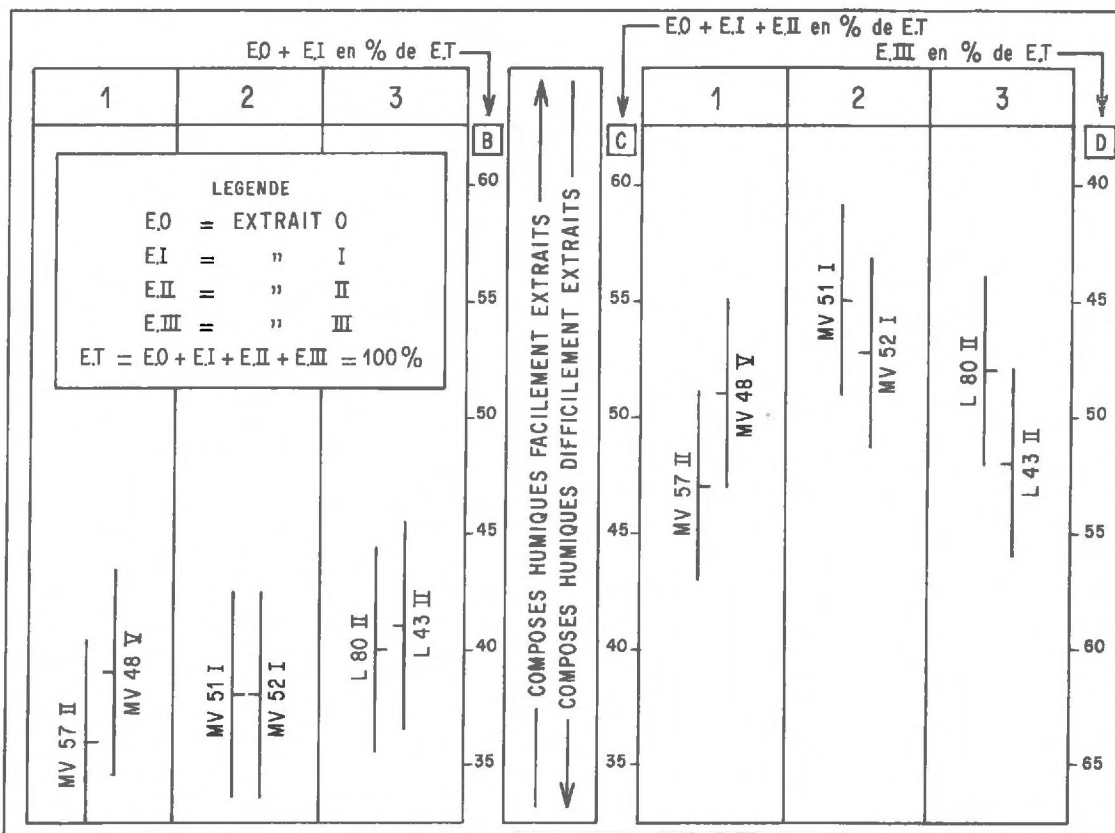


Figure 39 - Fractions densimétriques lourdes. Proportion de E.O, E.I, E.II et E.III en % des extraits totaux dans les sols fersiallitiques sans réserve calcique.

Il apparaît là, une première différence importante entre le profil organique des sols avec ou sans réserve calcique. Elle a déjà été schématisée dans la figure 24 page 126. Dans les premiers, il était à décroissance lente en fonction de la profondeur, à tendance "isohumique"; dans les seconds, il est très superficiel; comme le montre la figure 38 A, à 20 cm de profondeur, il y a moins de 1 % de matière organique dans ces sols.

Examinons rapidement les valeurs caractéristiques de ces types de matière organique, données dans la figure 38 en A, B, C et D. Le carbone organique des horizons A₁ ou A₂ est très variable, suivant qu'il s'agit d'un cryptomull ou d'un xéromoder (figure 38, A). Les valeurs de C/N (case B) apparaissent relativement élevées pour un mull, par ailleurs très bien structuré. Elles sont plus élevées, que dans les mulls des sols à réserve calcique. Comme nous verrons ci-après, ces hautes valeurs du C/N sont dues à la présence d'une fraction légère, relativement abondante. L'importance des acides humiques, exprimée en % de ac. humiques + ac. fulviques (case C) est, comme dans tous les sols examinés, très variable. L'augmentation de la proportion des acides fulviques en profondeur, visible sur les valeurs moyennes, n'est probablement pas significative. Le taux d'extraction (case D) est particulièrement faible dans ces sols. Cette observation sera expliquée dans la suite de ce chapitre.

Ces valeurs caractéristiques de la matière organique permettent donc une distinction très nette, entre les sols étudiés ici et ceux à réserve calcique. Cela justifie une étude plus approfondie de la matière organique. C'est l'objet de la deuxième partie de ce paragraphe.

Les méthodes utilisées sont les mêmes, que celles qui ont été présentées précédemment : séparation densimétrique, extraction fractionnée et électrophorèse (voir figure 30 page 145). Quatre types d'échantillons ont été soumis à l'analyse :

- Deux échantillons de cryptomulls de sols fersiallitiques sans réserve calcique, sous forêts ou taillis de Chêne pubescent.
- Deux échantillons également de cryptomulls des mêmes sols, provenant des pelouses de dégradation de la série du Chêne pubescent.
- Deux autres échantillons de cryptomulls, sous Chêne vert.
- Les deux derniers horizons sélectionnés sont des xéromoders; ils proviennent de la forêt de Chêne vert.

Les trois premiers types proviennent de sols rouges, faiblement lessivés; les horizons A₁ contiennent encore suffisamment d'argiles et de fer, pour permettre la formation d'un complexe organo-minéral; il s'agit de mulls très bien structurés. Les xéromoders, par contre, proviennent d'horizons très appauvris en argiles et en fer.

1.32 - SEPARATION DENSIMETRIQUE DES FRACTIONS LEGERES (1) ET LOURDES (L)

Les résultats de la séparation densimétrique sont donnés dans le tableau 10. Une observation est à mettre en relief. Elle concerne l'importance de la fraction densimétrique légère (avant dernière colonne du tableau). On constate, que tous les sols forestiers ont une fraction légère abondante. Elle est très élevée dans les xéromoders (65 % et 90 %) ; ceci est normal. Mais elle est encore importante dans les cryptomulls, en particulier, les deux échantillons de cryptomulls provenant de la série du Chêne vert (44 % et 48 %).

On a ici une confirmation de ce qui a déjà été exposé dans les chapitres précédents : sous la forêt de Chêne vert, les feuilles se décomposent lentement ; on en retrouve des débris importants dans les grumeaux des cryptomulls. Rappelons, que ces horizons sont par ailleurs très bien structurés. La fraction légère est mélangée à la terre fine par la faune fousseuse. Parmi les mulls analysés, c'est dans les sols rouges lessivés, que la proportion de la fraction légère est la plus élevée ; c'est aussi ici, que le milieu est le plus percolant et le plus sec. Le stade suivant est celui, où apparaît le xéromoder. D'autres paramètres ont permis de vérifier cette observation, en particulier le C/N élevé des cryptomulls. La fraction légère, sous Chêne pubescent, est moins importante que sous Chêne vert.

1.33 - EXTRACTION FRACTIONNÉE DES COMPOSES HUMIQUES

L'extraction fractionnée a été effectuée de la même manière, déjà exposée dans un chapitre précédent (figure 30 page 145). Les résultats sont également exprimés sous les mêmes formes. Dans le tableau 11, les fractions EO, EI, EII, EIII, humine ou matière organique fraîche sont données en % du carbone total de la fraction densimétrique lourde (L) ou légère (1). Dans ce tableau, l'interprétation de la dernière colonne est intéressante. On constate que l'humine, c'est-à-dire le carbone non extrait de la fraction lourde (L), est importante. En particulier, dans les cryptomulls sous Chêne vert, on atteint des valeurs de 70 % (N°3 du tableau 11). Parmi tous les profils examinés par cette méthode, ce sont les chiffres les plus élevés.

Les fractions EO, EI, EII et EIII, exprimées en % du carbone total extrait (E T), sont représentées dans la figure 39. Elles sont également données sous forme cumulative :

$$\boxed{EO + EI + EII + EIII = ET = 100 \%} \text{ (revoir figure 30 page 145).}$$

EO + EI est lu à l'échelle B, EO + EI + EII à l'échelle C et enfin, EIII en D. Les colonnes 1, 2 et 3 portent aux mêmes numéros de repérage, que ceux du tableau 11. Ces résultats ne concernent, que les fractions densimétriques lourdes. Il convient de les expliquer, en les comparant à ceux de la figure 33, page 157. Les échelles, dans les deux figures, sont identiques et les lettres B, C et D sont également correspondantes.

FERSIALITTIQUES SANS RESERVE CALCIQUE SOUS LES SERIES DU CHENE PUBESCENT ET DU CHENE VERT

TYPES DE SOLS SERIE DE VEGETATION FORMATIONS VEGETALES	TYPES D' HORIZONS	TYPES DE MATIERE ORGANIQUE	EPAISSEUR DE L'HORI ZON ORGA- NIQUE en cm	N° DU PROFIL	T en % x	l en % xx	L en % xxx	C de l	C de L
								en % de C	TOTAL
SOL FERSIALITTIQUE SANS RESERVE CALCIQUE SERIE DU C. PUBESCENT FORETS ET TAILLIS	A ₁	Crypto- Mull	7	MV 57 II	5,5	33,7	4,8	19,9	80,1
	A ₁	Crypto- Mull	5	MV 48 V	6,2	32,0	4,8	31,1	68,9
id. PELOUSES	A ₁	Crypto- Mull	20 *)	MV 51 I	1,8	25,3	1,9	7,5	92,5
	A ₁	Crypto- Mull	17 *)	MV 52 I	1,4	37,2	1,4	13,6	86,4
SOL FERSIALITTIQUE SANS RESERVE CALCIQUE SERIE DU CHENE-VERT FORETS ET TAILLIS	A ₁	Crypto- Mull	5	L 43 II	8,4	32,2	3,9	44,0	56,0
	A ₁	Crypto- Mull	6	L 80 II	6,2	31,4	4,2	48,2	51,8
	A ₀	Xéro- Moder	3	L 54 II	15,6	34,0	3,6	65,4	34,6
	A ₀	Xéro- Moder	2	L 55 II	17,0	36,0	4,3	90,0	10,0

x T : carbone organique total en % de la terre fine : C. TOTAL

xx l : carbone contenu en grammes dans 100 grammes de fraction légère

xxx L : carbone contenu en grammes dans 100 grammes de fraction lourde.

*) Voir note à la base de la page 182, concernant les sols sous pelouses.

TABLEAU 11 - EXTRACTION FRACTIONNEE : CARBONE ORGANIQUE DES EXTRAITS O, I, II, III et HUMINE ou MATIERE ORGANIQUE FRAICHE EN % DU CARBONE TOTAL DE LA FRACTION DENSIMETRIQUE LOURDE (L) ou LEGERE (1)

TYPES DE SOLS, SERIES DE VEGETATION FORMATIONS VEGETALES	TYPES D' HORIZONS	N° de REPERAGE	N° du PROFIL	FRACTION DENSI- METRIQUE	EO	EI	EII	EIII	HUMINE M.O. FRAICHE
					en % du C. ORG. de la FRACTION densimétrique				
SOLS FERIALLITQUES SANS RESERVE CALCIQUE SERIE DU CHENE PUBESCENT FORETS ET TAILLIS	A ₁	1	MV 57 II	L	-	14,3	4,2	20,7	60,8
				1	-	7,1	3,1	16,0	73,8
	A ₁		MV 48 V	L	-	13,8	4,0	17,3	64,9
id. PELOUSES	A ₁	2	MV 51 I	L	-	17,5	7,3	20,8	54,4
	A ₁		MV 52 I	L	-	18,4	7,3	22,0	52,3
SOLS FERIALLITQUES SANS RESERVE CALCIQUE SERIE DU CHENE VERT FORETS ET TAILLIS	A ₁	3	L 43 II	L	2,0	10,0	3,5	14,5	70,0
	A ₁		L 80 II	L	2,1	10,1	2,3	15,5	70,0
		A ₀		L 54 II	1	-	8,0	2,1	12,9

Les renseignements obtenus sont intéressants. On constate en effet, que les composés humiques de ces sols sont très difficilement extractibles. Les proportions de carbone, extraites à la soude (EIII, échelle D), sont les plus importantes, parmi tous les sols examinés. Celles, extraites en EO + EI, (pyrophosphate de Na à pH 7, échelle B) sont les plus faibles. Les fractions lourdes des sols rouges lessivés ont des composés humiques énergiquement liés au complexe organo-minéral. Comment expliquer cette observation ? Il s'agit d'horizons appauvris : ils contiennent peu d'argiles; celles qui subsistent sont du type interstratifié. Ils contiennent également peu de fer, celui-ci se trouve sous forme "libre", à 70 - 75 %. Le complexe absorbant est partiellement désaturé et les horizons sous-jacents sont très perméables. Rappelons, qu'à l'extraction fractionnée, le comportement de la matière organique des sols ferralsitiques à réserve calcique était différent : le carbone extrait en EI était important. La proportion obtenue en EIII était faible. Rappelons aussi, que l'horizon humifère n'était là pas appauvri, ni en argiles, ni en fer. Le complexe absorbant restait fortement saturé et le milieu était moins perméable. Les deux types de sols se trouvent juxtaposés, sous des conditions bioclimatiques identiques.

L'interprétation proposée repose sur les mêmes hypothèses déjà exposées précédemment. La forte liaison des composés humiques dans le complexe organo-minéral est explicable de deux manières :

- D'abord, dans ces milieux très percolants, les composés humiques solubles sont rapidement entraînés en hiver, puis biodégradés pendant leur migration. Dans les sols à réserve calcique, la migration est moindre ou inexistante.

- Par ailleurs, on a ici un exemple de plus, de mull développé en présence d'un complexe absorbant partiellement désaturé et dont la matière organique est fortement liée. Dans les milieux saturés, les ions calciques, facilement mobilisables, forment avec la matière organique des liaisons relativement faibles. Dans les horizons en voie de désaturation, les liaisons sont plus énergiques. Ce fait a déjà été observé précédemment et l'hypothèse de la présence de composés organiques liés par le fer avait alors été proposée .

1.34 - EXAMEN DES ACIDES HUMIQUES PAR ELECTROPHORESE

Les acides humiques des extraits I et II ont été soumis à l'électrophorèse, sur papier cellulose. La méthode utilisée a été exposée précédemment. Les résultats obtenus sont exprimés dans la figure 40. Ceux, concernant les E I, sont représentés en trait plein et ceux, concernant les EII, sont en tiretés. Ils sont sous forme

cumulative, de la même manière que dans les figures 36 et 37, pages 164 et 165. $AHI + AHi + AHM = 100 \%$. AHI est lu à l'échelle A ; AHi est lu en B et AHM en C. Les acides humiques très polymérisés sont en haut de la figure, les moins polymérisés en bas. L'interprétation des résultats s'avère difficile. Une première difficulté vient du fait, que les intervalles de confiance, obtenus à partir des résultats de cette méthode, sont très grands. Cet inconvénient a déjà été mentionné. Rappelons les résultats obtenus par l'électrophorèse des acides humiques extraits des sols fersiallitiques à réserve calcique : les acides humiques de ces sols étaient fortement polymérisés, autant pour ceux de EI que ceux de EII. Les acides humiques des cryptomulls des sols sans réserve calcique (figure 40) diffèrent des précédents, par deux points essentiels. D'une part, les résultats obtenus ici, à partir des sols sous Chêne pubescent (forêt, colonne 1 ; pelouses, colonne 2) et sous Chêne vert (forêts 3), sont plus hétérogènes, que dans les sols à réserve calcique. Par ailleurs, considérés dans leur ensemble, les acides humiques des sols sans réserve calcique semblent moins polymérisés, c'est-à-dire plus mobiles dans le champ électrique, que les précédents. Cette remarque est valable, pour les extraits I et pour les extraits II. A partir des résultats obtenus dans ce travail, il n'a pas été possible d'apporter une interprétation satisfaisante de ces données de l'électrophorèse. Une explication est possible, en ce qui concerne les acides humiques de l'extrait II. C'est là, où dans les trois colonnes de la figure 40, les résultats sont les plus hétérogènes et où, en particulier pour le Chêne vert (colonne 3), la proportion des AHM reste importante : la possibilité d'une néoformation à pH 10 (EII) de composés humiques peu polymérisés, à partir du complexe organo-minéral très stable, n'est pas à exclure.

1.4 - CONCLUSION

Sur roches-mères calcaires siliceuses, les résidus accumulés sont abondants. Le karst est enterré sous une couche de silex, de chailles, d'argiles de décarbonatation ou d'apports allochtones. Ce matériel ancien est souvent profondément remanié. Ses épaisseurs sont très variables. Il ne contient plus de réserve calcaire et il est décarbonaté. C'est là, que se sont développés et conservés, dans le midi de la France, des sols du type rouge méditerranéen lessivé encore appelés fersiallitiques sans réserve calcique.

Au congrès sur les sols méditerranéens, de Madrid, en 1966, l'existence de sols rouges méditerranéens non lessivés avait été mise en doute. Ce travail a montré, que dans ces sols rouges, l'entraînement des argiles ou du fer est étroitement conditionné par l'absence ou la présence de réserve calcique, dans les horizons supérieurs du profil. Dans les sols fersiallitiques à réserve calcique, l'entraînement reste réduit, malgré le grand âge de ces sols. Dans les sols fersiallitiques sans réserve calcique, les stades d'évolution sont très variables. Mais ces profils sont généralement, nettement plus lessivés que les précédents.

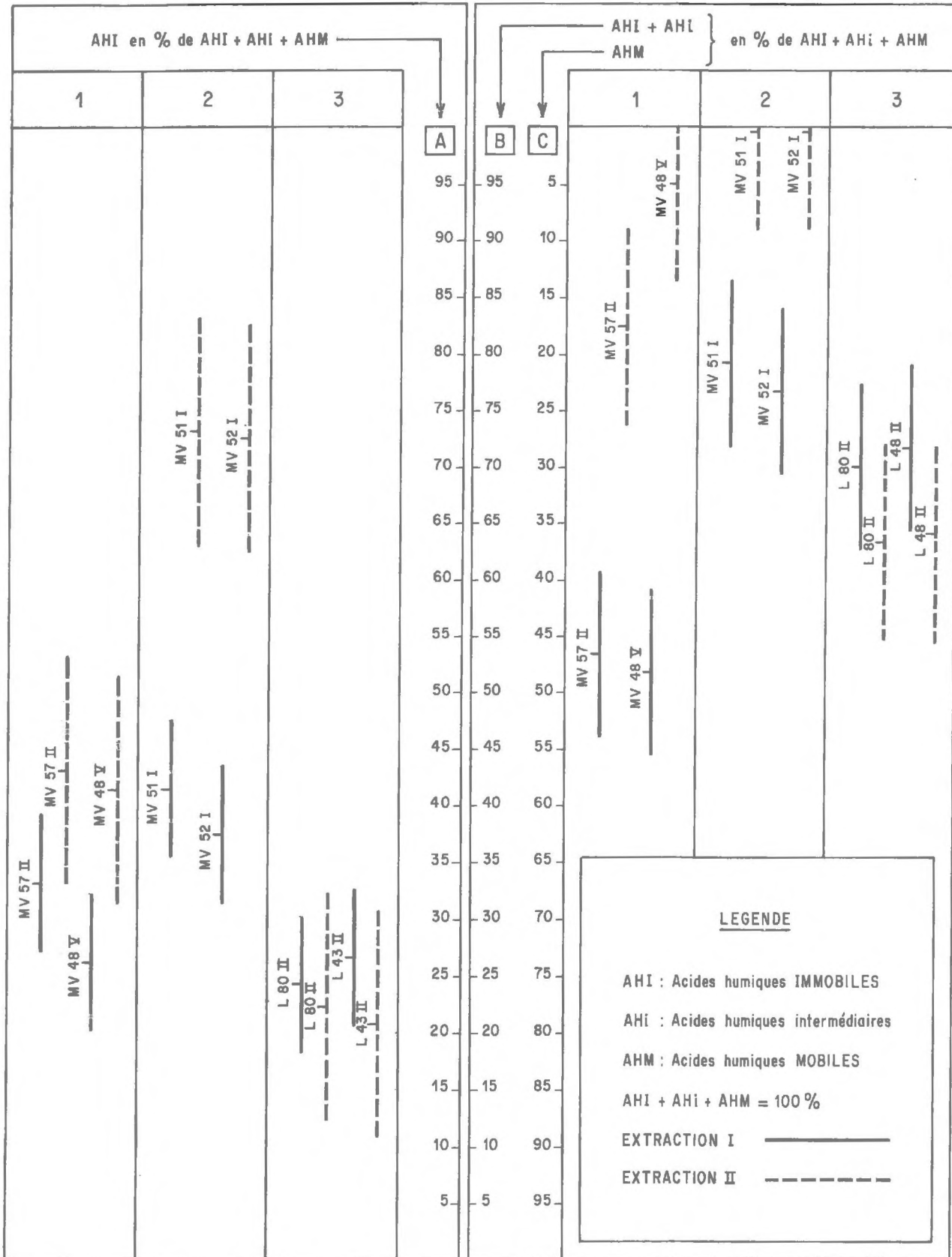


Figure 40 – Fractionnement des acides humiques par électrophorèse des sols fersiallitiques sans réserve calcique. Fractions densimétriques lourdes. Extraits I et II.

Dans les sols rouges méditerranéens, les argiles et le fer se comportent de la même manière, c'est-à-dire, lorsqu'il y a entraînement, les deux éléments sont lessivés ; on n'observe pas de ségrégation entre fer et argiles. C'est à ce titre, que le terme "fersiallitique", proposé par la CPCS (1967), est justifié.

Dans les sols sans réserve calcique, quatre caractères essentiels sont à mettre en évidence :

- Le premier concerne le complexe absorbant ; il reste relativement saturé, même dans les horizons lessivés. Ceci distingue ces sols, des "sols lessivés" dont il sera question dans un chapitre ultérieur.

- L'état du fer, dans les horizons éluviaux et illuviaux, pose un problème particulier. La méthode DEB, utilisée n'a pas permis de les différencier. Les travaux de SEGALLEN, à ce sujet, ont déjà été signalés.

- L'évolution des argiles dans les sols fersiallitiques a également été abordée. Ce domaine n'a pas été très approfondi, puisque un travail important sur ce sujet, a été réalisé récemment par PAQUET (1969). Alors que les sols à réserve calcique constituent un milieu conservateur, dans ceux sans réserve calcique, on observe une certaine altération par dégradation, mais elle reste ménagée.

- C'est l'étude de la matière organique dans ces sols, qui a apporté le plus de données nouvelles. Alors que dans les sols à réserve calcique, le profil organique était lentement décroissant en fonction de la profondeur, celui des sols sans réserve calcique est tout à fait superficiel. Dans les premiers, la protection de la matière organique est assurée, par la persistance dans les horizons supérieurs d'argile en grande abondance et d'ions calciques facilement mobilisables. L'activité des lombricidés s'exerce encore en profondeur. Il n'en est plus de même, dans les seconds. Les argiles sont moins abondantes ; le calcium des garnitures ioniques est davantage retenu et le milieu trop sableux n'est plus très favorable aux lombricidés. Deux types de matière organique ont été distingués : les xéromodères dans les horizons très appauvris et les cryptomulls, formés en présence d'une quantité suffisante d'argiles et de fer.

La séparation densimétrique des fractions organiques lourdes et légères a permis de montrer, que même les cryptomulls contenaient encore une fraction importante de débris de feuilles non décomposées. Ceci est étonnant, puisque ces horizons ont une très belle structure, souvent constituée exclusivement de tortillons de vers de terre. La raison en est le caractère xéromorphe des feuilles, en particulier celles du Chêne vert et la rapidité avec laquelle ces horizons se dessèchent.

Intimement mélangé à la matière organique non décomposée, existe l'humus, qui lui par contre, est très évolué. Les composés humiques sont difficilement extractibles et la fraction humine est, dans ces sols, la plus importante, parmi tous les mulls examinés. Ceci a été interprété, comme étant dû à une élimination rapide des composés humiques mobiles à travers ces milieux perméables et à leur minéralisation, également rapide, pendant leur migration dans les horizons A₂. Les conditions bioclimatiques sont favorables, soit à leur biodégradation, soit à leur polymérisation. Mais il s'agit là d'interprétations; en particulier le rôle des types d'argile n'est pas connu.

Il convient de signaler, que dans des sols lessivés sur schistes, également sous Chêne vert, des types de matière organique semblables ont été étudiés, par WAREMBOURG (1969), dans les basses vallées des Cévennes. Ces résultats sont aussi comparables à ceux obtenus par DUCHAUFOR et DOMMERGUES (1963), concernant la matière organique d'un sol sur schistes, sous Chêne vert, et appelé alors par MULLER (1963) "sol brun méditerranéen".

En définitive, ces cryptomulls constituent un type de matière organique également original : ils contiennent une quantité importante de fraction légère, qui détermine, dans la matière organique globale, des C/N élevés. Intimement mélangée à celle-ci par les lombricidés, coexiste la fraction lourde, qui, elle, est très évoluée.

CHAPITRE II

2 - LES SOLS SUR DOLOMIES

Ce chapitre sera succinct, puisque l'altération des dolomies, les types de sols rencontrés sur ces roches-mères et l'importance du magnésium dans le complexe absorbant, ont fait l'objet d'une note de BOTTIER et BOUKHRIS (1969) et plus récemment encore d'un travail de CADILLON (1970).

2.1 - ALTERATION DE LA ROCHE-MERE DOLOMITIQUE

Sur le terrain, la distinction entre calcaire et dolomie est souvent délicate. Pour les différencier, les géologues et les minéralogistes ont été amenés à utiliser des méthodes précises, telles que l'action des acides ou des colorants spécifiques, l'emploi des rayons X et l'analyse chimique (BRYDON et RICE, 1965).

Cette dernière a permis de distinguer, depuis la dolomie pure, carbonate double de calcium et de magnésium, au calcaire pur, une série de roches intermédiaires, dont voici, selon JUNG (1963), la classification :

TABLEAU 12 Classification des roches dolomitiques d'après JUNG, 1963

Roches	% dolomite	CaO/MgO
Calcaires	0 à 5	≥ 49,7
Calcaires magnésiens	5 à 10	49,7 à 24,51
Calcaires dolomitiques	10 à 50	24,51 à 3,96
Dolomies calcarifères	50 à 90	3,96 à 1,70
Dolomies	90 à 100	1,70 à 1,39

Sur le plan morphologique, deux types de dolomies se distinguent : les dolomies compactes, qui ont le même aspect que les calcaires ; mais elles sont plus dures, moins altérables et ne font pas effervescence à froid à HCl au 1/2. Leur produit d'altération est constitué de limons et d'argiles. L'autre type est représenté par les dolomies cristallines. Celles-ci sont constituées d'une mosaïque de cristaux de dolomite et de calcite intimement mélangés et imbriqués les uns dans les autres, ou bien de cristaux de dolomite cimentés par de la calcite (BARON (1960)).

Suivant les faciès, la taille des cristaux est variable et CADILLON (1970) distingue des dolomies saccharoïdes à gros grains, des cristallines et des microcristallines. Ces dernières contiennent plus d'impuretés que les premières. Les grains de dolomite, moins solubles, sont libérés par la dissolution de la calcite. Ils donnent origine sur les massifs dolomitiques à une importante accumulation de matériel résiduel essentiellement sableux : le sable dolomitique.

Dans les différents horizons de 25 profils de sols sur sables dolomitiques du Languedoc et des Grands Causses, une quarantaine de lots de cailloux ou de roches en place ont été échantillonnés. Le rapport CaO/MgO est déterminé pour chaque lot. Les résultats sont présentés dans le tableau 13 en A. Les valeurs de ce rapport sont très variables et leur répartition dans les classes de fréquence est désordonnée. Il n'a pas été possible d'établir une relation entre CaO/MgO et les différents étages géologiques, d'où provenait la dolomie, ni entre CaO/MgO et les types d'horizons des sols, où les cailloux ont été échantillonnés.

TABLEAU 13 Répartition de la dolomite dans la roche et les sables dolomitiques

Classes de fréquence	% de Dolomite	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	CaO/MgO correspondant	1,4	1,7	2,0	2,5	3,1	4,0	5,2	7,4	11,7	24,5
Nombre d'échantillons présents dans chaque classe	A) Roches ou cailloux dolomitiques	11	6	1	8	0	1	3	2	3	2
	B) Sables dolomitiques	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les rapports CaO/MgO ont également été déterminés sur les sables dolomitiques des mêmes profils. Les résultats sont présentés en B du tableau 13. Ces sables s'avèrent d'une composition chimique très homogène : le rapport CaO/MgO varie de 1,4 à 1,6. Ces valeurs sont proches de celles calculées pour la dolomite pure : 1,39.

En définitive, les roches dolomitiques sont d'une composition chimique très variable, qui va de celle du calcaire faiblement magnésien à la dolomie pure. La longue altération, à la fois physique et chimique, à laquelle ces massifs ont été soumis, sous des conditions climatiques vraisemblablement très variables, aboutit à la formation d'un produit résiduel sableux, constitué exclusivement de dolomite, c'est le sable dolomitique.

Ce matériel remplit les fissures du karst dolomitique ou en recouvre les surfaces. La granulométrie des sables dolomitiques est souvent exclusivement sableuse, grossière ou fine, ou limoneuse, suivant la texture de la roche-mère. Mais ce matériel est parfois aussi pollué par des apports allochtones, tels que des limons ou des argiles produits éoliens ou argiles de décarbonatation des massifs calcaires.

2.2. - LES SOLS SUR SABLES DOLOMITIQUES

Le sable dolomitique est considéré comme un matériel géomorphologique. Ce n'est pas un paléosol, puisque, trop sensible à l'érosion, il est profondément remanié. C'est la roche-mère des sols actuels.

Elle a été rencontrée sous la plupart des séries de végétation : en particulier dans le Vercors sous la pelouse pseudoalpine et la pessière, dans les Grands Causses sous la hêtraie mésophile et la chênaie pubescente et dans le Languedoc sous la chênaie d'Yeuse.

La présence de la dolomie compacte, celle qui est très dure et ne donne pas de sable dolomitique, n'affecte guère la morphologie des sols. Sous une même série de végétation, les sols sur dolomies compactes sont identiques, à ceux sur calcaires durs et purs. On constate, que Mg^{++} exprimé en % de la somme des bases est un peu plus élevé sur dolomie que sur calcaire. Mais cette différence n'est pas très importante.

La présence de sables dolomitiques affecte davantage l'évolution des sols. Le problème qui se pose est le suivant : les sols sur sables dolomitiques sont-ils suffisamment individualisés pour justifier, dans la systématique des sols, des groupes ou des sous-groupes de sols dolomitiques, ou bien cette distinction doit-elle simplement intervenir au niveau de la famille ?

Deux profils retiennent l'attention ici. Le premier est du type AoC. L'horizon C est constitué par le sable dolomitique et Ao est un moder *). Ce sol a été observé sous Hêtre, moins fréquemment sous Chêne pubescent et plus rarement sous Chêne vert. Comme pour tous les sols examinés dans ce travail, l'accumulation de matière organique peu décomposée est liée à l'absence d'argiles dans l'horizon C. Les moders, pour la hêtraie, ou les xéromoders, pour la chênaie pubescente ou d'Yeuse, ont les mêmes caractères que ceux qui ont été étudiés précédemment. Il s'agit là, de sols litho-calciques humifères à moder, sur sables dolomitiques. Il serait plus exact, de les appeler "litho-dolomitiques" ou "litho-magnésique". Mais la similitude de ces sols, avec les sols litho-calciques à moder étudiés sur calcaire, ne justifie

*) Voir note en bas de la page 30.

pas la création de ce nouveau terme. A ce groupe de sol avec Ao sur dolomies, appartiennent aussi les profils du type Ao A₁ C. L'horizon A₁ du type mull, s'est développé dans le sable dolomitique, en présence d'une plus ou moins faible quantité d'argile. La présence des grains dolomitiques affecte cet horizon, d'une consistance fragile et d'une structure presque particulaire. La présence de dolomie se manifeste, ici aussi, par une proportion plus importante de Mg⁺⁺ dans la somme des bases. Il s'agit là, de sols humiques carbonatés. Enfin, toujours dans ce premier groupe de sols avec un horizon Ao, il faut aussi mentionner l'existence de sols litho-calcaïques à mull-moder, sur sables dolomitiques, sous les pelouses pseudoalpines. Ils ont des caractères tout à fait semblables à ceux sur calcaire.

Le deuxième groupe de sols sur roches-mères dolomitiques est représenté par la rendzine dolomitique. Elle est liée aux pelouses de dégradation de la forêt, là où ne s'accumule plus d'humus brut issu de la litière. La matière organique, formée essentiellement aux dépens des racines, est incorporée au sable dolomitique. Le profil est du type A₁ C. Comme précédemment, l'horizon C est constitué de sable dolomitique, l'horizon A n'est pas assez organique pour être un mull-moder ; sa texture est sableuse ; sa structure est particulaire ; son pH est très élevé : entre 8 et 9 (pH H₂O) ou 7,5 et 8 (pH KCl) ; la capacité totale d'échange est faible : de 5 à 10 m. e./100gr de sol ; le complexe absorbant est saturé et enfin, Mg⁺⁺ en % de S atteint des valeurs de l'ordre de 10 à 30 %. Ce sont là, un certain nombre de caractères originaux de ces sols. Ceux-ci sont distincts des rendzines sur calcaire et méritent d'être définis dans la classification. La CPCS les appelle "Cryptorendzines". Elle les fait intervenir au niveau du groupe, il serait, à notre avis, préférable de les distinguer simplement au niveau du sous-groupe.

Il est évident, qu'entre les sols sur sables dolomitiques, décrits ici et ceux sur calcaires compacts, il existe toute une transition. Lorsque le sable est accompagné d'une quantité croissante d'argiles, la structure particulaire disparaît, le pH diminue et la proportion de Mg⁺⁺ baisse.

Les dolomies sont originales, par leur mode d'altération et par le sable dolomitique qui s'accumule à leur surface. Mais parmi les sols formés, seuls la rendzine dolomitique, encore appelée cryptorendzine, a des caractères particuliers qui méritent d'être retenus.

CHAPITRE III

3 - PEDOGENESE SUR ROCHES-MERES CALCAIRES TENDRES : EVOLUTION DES SOLS A COMPLEXE ABSORBANT DESATURE

Dans le Languedoc, les calcaires tendres sont surtout tertiaires. Ils se sont accumulés dans des lacs et des mers peu profondes, où les apports d'éléments détritiques étaient importants. Dans les Préalpes, ils ont pris une grande extension dans le Diois et les Baronnies. Ils sont alors du Jurassique supérieur ou du Crétacé inférieur (carte 1 page 6). C'est le faciès marneux, qui correspond à la Fosse Vocontienne. Au Nord de celle-ci, dans le Vercors ou au Sud, en Haute Provence, on retrouve ce même faciès marneux, en couches plus ou moins épaisses, intercalées entre les calcaires compacts urgoniens. L'évolution des sols sur calcaires tendres a été examinée, sous tous les étages bioclimatiques.

3.1 - ALTERATION DES ROCHES-MERES CALCAIRES TENDRES

Dans l'altération des roches-mères calcaires tendres, deux processus sont possibles ; l'altération mécanique et la dissolution.

L'altération essentiellement mécanique prédomine sous les conditions méditerranéennes. Sur ces calcaires tendres, l'érosion et les remaniements jouent un rôle important. Les surfaces sont jeunes, les sols sont actuels et peu différenciés.

La prédominance de la dissolution sur l'altération physique est soumise à deux conditions :

- la présence d'un tapis végétal fermé et suffisamment dense, qui protège le sol vis à vis de l'érosion.
- l'existence d'un milieu bioclimatique favorable à la décarbonatation: percolation importante, eaux froides, présence d'une litière acide ou génératrice d'humus brut.

Ces conditions sont réalisées en montagne, sous les étages subalpin et montagnard.

Sur calcaires tendres, les mécanismes de la dissolution des carbonates sont différents, de ceux sur calcaires karstiques. Ils ont été étudiés par YAALON (1954) et par RAVIKOVITCH et PINES (1967). Sur calcaires compacts, l'altération est pelliculaire ; l'eau ne pénètre pas à l'intérieur de la roche ou du caillou. La dissolution est donc lente ; mais les eaux restent agressives sur une grande profondeur, d'où la formation de fentes karstiques. Les roches-mères calcaires tendres, plus riches en résidu fin, moins compactes, sont poreuses.

L'eau pénètre à l'intérieur de la roche ; les surfaces de dissolution sont très amplifiées ; la mise en solution des carbonates est alors accélérée, mais par contre les eaux agressives sont rapidement neutralisées ; elles sont inactives en profondeur et ces calcaires sont rarement karstifiés.

On assiste ici, à la formation dans le sol, d'un front de dissolution, encore appelé, dans la suite, front de décarbonatation. Une illustration de celui-ci est donnée dans la figure 43. Sur le plan morphologique, c'est la ligne souvent nette, qui sépare deux types d'horizons du profil calcaire : d'une part, les horizons C sous-jacents, encore très carbonatés et constitués de calcaire tendre fortement broyé par la gélifraction et par ailleurs, les horizons A, (B) ou B situés au dessus, sans réserve calcique, décarbonatés, désaturés, et acidifiés. Là, seuls quelques cailloux calcaires durs ont résisté à la dissolution. Ils sont trop peu abondants, pour constituer une réserve calcique capable d'éviter l'acidification du milieu. Dans le profil V 27, schématisé dans la figure 43, on passe de 0 % de CO_3Ca au-dessus du front, à 46 % dans les dix premiers centimètres situés dessous. Sur le plan de la dynamique, le front de dissolution est la ligne, au contact de laquelle, les solutions agressives qui ont conservé leur acidité dans les horizons supérieurs, sont rapidement neutralisées. Cependant des horizons C_1 à C_2 (figure 43), on observe encore une certaine décarbonatation ; mais elle est réduite. Dans le premier horizon, le calcaire se trouve essentiellement dans les sables et les cailloux ; dans le deuxième, une proportion importante est conservée dans les argiles et les limons.

La distinction, entre un profil avec front de dissolution et un sol, dans lequel le matériel décarbonaté est issu de colluvionnement, est souvent délicate. Cependant, l'existence du front de dissolution sur calcaires tendres n'est pas à mettre en doute. Il est presque toujours présent en montagne, sur calcaires marneux. En particulier, il a été observé dans des positions topographiques, où des colluvionnements et tout autre apport allochtone sont à exclure. Lorsque la roche-mère tend vers des calcaires plus compacts et moins poreux, le squelette calcaire situé au dessus du front devient de plus en plus abondant. La vitesse de décarbonatation est liée à un ensemble de facteurs, parmi lesquels il faut citer, le degré de porosité et de perméabilité de la roche-mère et les conditions bioclimatiques.

Précisons de suite, que sur les roches-mères calcaires tendres examinées, la pseudogleyfication a été rarement observée. Elle se produit, sous des climats très arrosés et dans des calcaires riches en argiles. Le milieu devient hydromorphe, alors que la décarbonatation complète du sol n'est pas encore réalisée. Dans la séquence étudiée, très peu de sols hydromorphes ont été rencontrés. Après une prospection sommaire, réalisée par BOULAINÉ dans le Haut-Jura, il semble que ces sols soient là plus fréquents, que dans le Vercors. Le climat y est aussi plus humide.

LEGENDE des figures — CO₃Ca : dans les argiles (horizontal lines), dans les limons (diagonal lines), dans les sables (dots)

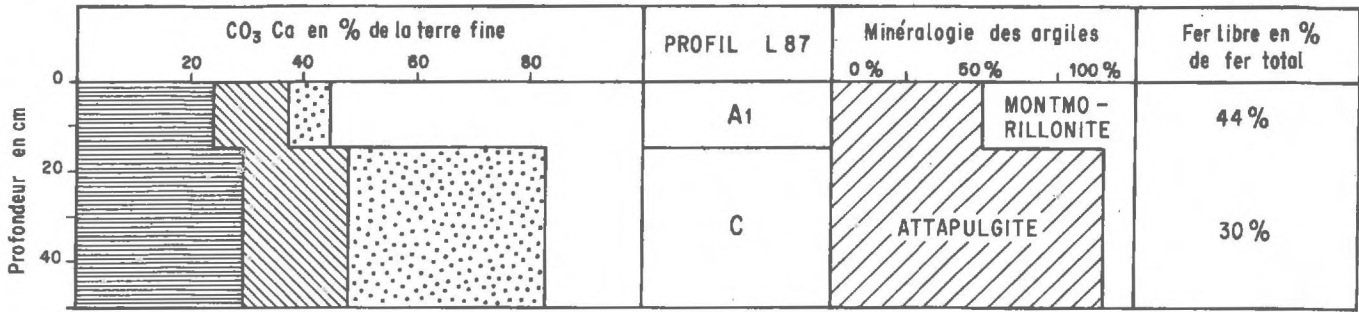


Figure 41 - Rendzine sur calcaire tendre : Répartition des carbonates. Minéralogie des argiles . Fer libre / Fer total .

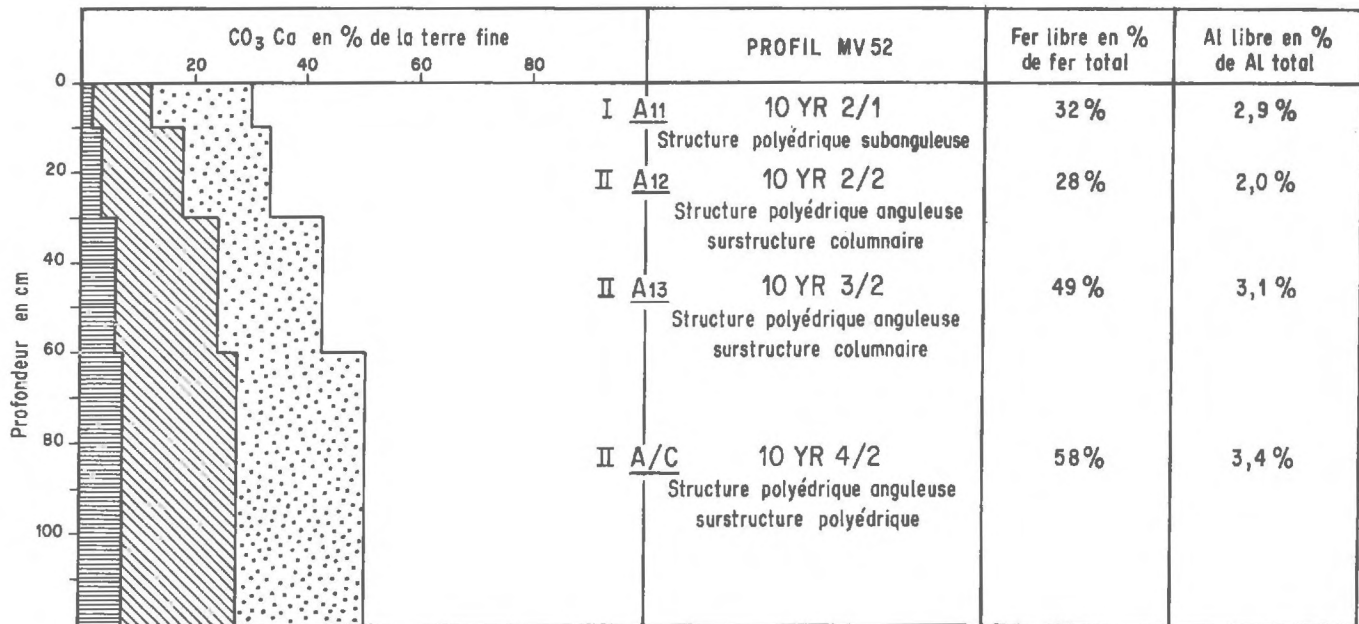


Figure 42 - Un exemple de sol brun calcaire verticale .

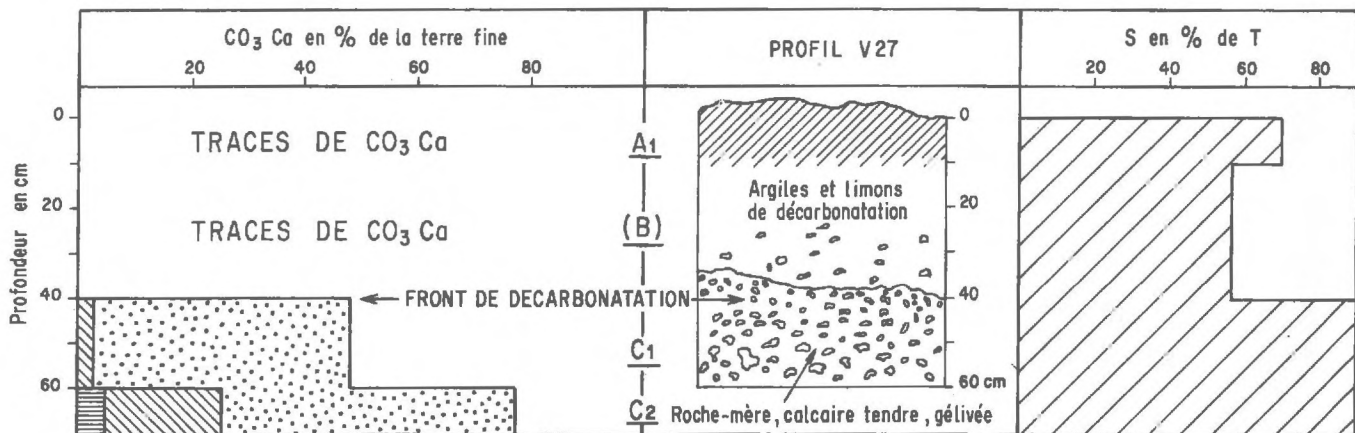


Figure 43 - Le front de dissolution sur calcaires tendres en montagne . Exemple d'un sol brun acide .

3.2 - EVOLUTION DES SOLS SUR ROCHES-MERES CALCAIRES TENDRES, SOUS LES CONDITIONS MEDITERRANEEENNES

Sous les conditions méditerranéennes, l'altération mécanique et les remaniements l'emportent sur la dissolution. Les surfaces sur calcaires tendres sont jeunes ; elles ont rarement conservé des sols anciens. Les sols sont peu différenciés ; ils sont actuels ou subactuels. Dans le Languedoc et les Monts du Vaucluse, les profils le plus fréquemment rencontrés sont du type rendzine, sol brun calcaire modal ou à caractères vertiques et sol brun calcique. Un certain nombre de points les concernant, sont à mettre en évidence.

Le premier est d'ordre morphologique. La cartographie a soulevé des problèmes, au sujet de la systématique des sols carbonatés. La difficulté majeure réside dans la définition des horizons (B) des sols bruns calcaires et dans leur distinction, avec les horizons profonds de certaines rendzines épaisses. En effet, les horizons (B) sont souvent peu reconnaissables. Ou bien, le sol s'est développé sur un matériel colluvial non encore organisé, ou bien la structure du (B) a été remaniée par l'homme. Le problème de la subdivision des sols carbonatés n'est pas résolu. Certaines propositions sont faites par les cartographes.

Le deuxième point concerne l'âge des sols carbonatés. Il y a là deux possibilités. Ou bien, il s'agit d'un matériel ancien, remanié et recarbonaté, à partir de la roche-mère calcaire tendre sensible à l'érosion. Ou bien, c'est un matériel récent, peu altéré et n'ayant jamais subi une décarbonatation complète. Ce dernier cas a été vérifié, à partir de la minéralogie des argiles. Une illustration en est donnée, dans la figure 41. Il s'agit d'une rendzine sur marnes éocènes, du Bassin de Saint-Martin-de-Londres, près de Montpellier. Les argiles de cette roche-mère sont constituées d'attapulгите à 90 %. Les 10 autres % sont de la montmorillonite, avec des traces d'illite. Comme l'ont montré FRANC de FERRIERE (1961), CAMEZ (1962), MILLOT (1964) et PAQUET (1969), l'attapulгите est un minéral facilement altérable, rarement conservé dans les sols. Or, dans la rendzine étudiée, elle subsiste à 50 % en A₁. Il s'agit donc, dans le cas examiné ici, d'un matériel récent et peu altéré.

La répartition des carbonates dans les fractions granulométriques est un autre point intéressant à signaler. Dans les sols sur calcaires durs, le CO₃Ca se trouvait essentiellement dans les sables. Comme le montre les figures 41 et 42, sur calcaires tendres, une proportion importante se trouve jusque dans les argiles. Il convient à ce sujet aussi, de réexaminer la figure 18 page 106, concernant d'autres exemples de rendzines.

Le rapport Fer libre/fer total a été établi dans les horizons d'une dizaine de sols carbonatés. Dans ce travail, ce rapport n'a pas toujours fourni des renseignements intéressants. Pour les sols carbonatés, les résultats ont été comparés, à ceux des sols fersiallitiques à réserve calcique. Ils sont donnés dans la figure 22 page 120. Les rapports sont faibles dans les sols carbonatés : de l'ordre de 40 % et la différence avec les sols fersiallitiques est hautement significative.

Les sols bruns calcaires à caractères vertiques sont rares. En général, ils sont situés dans les bas fonds et se développent sur du matériel colluvial. Les caractères essentiels d'un tel sol sont donnés dans la figure 42. Le profil est localisé sur le plateau de Saint Christol, dans les Monts du Vaucluse. De sa morphologie, il convient de retenir la couleur foncée jusque dans les horizons profonds, l'existence de surstructure en colonnes dans les horizons moyens et enfin la présence fréquente à la base du sol d'un horizon B_{Ca} à nodules farineux. Comme le montre la figure, le calcaire sous forme fine est présent jusqu'à la surface du sol. La proportion du fer libre est également peu importante ; elle augmente avec la profondeur. De même, les rapports Al libre en % de Al total sont très faibles et augmentent aussi légèrement avec la profondeur.

Entre les calcaires tendres et les calcaires compacts, existe dans le midi de la France toute une transition de roches, qui sont moins sensibles à l'érosion que les calcaires tendres et qui se dissolvent probablement plus vite que les compacts. Ces roches portent des sols qui ont particulièrement attiré notre attention. Il s'agit de profils du type A_1R ou $A_1(B)R$, ils sont peu éraillés ; à la base de l'horizon A_1 ou (B) apparaît fréquemment un horizon B_{Ca} . Ces sols sont légèrement calcaires ou plus rarement simplement calciques. Ils pourraient très bien résulter de pédogénèse récente ; or, ils présentent des caractères morphologiques comparables à ceux des horizons A_1 et A_3 des sols fersiallitiques à réserve calcique ; en particulier leur couleur est de 5 YR 4/3 en A_1 et 5 YR 4/4 en (B). Il pourrait donc s'agir ici d'une rubéfaction récente ou actuelle. Cependant, ces sols ne sont jamais suffisamment profonds pour présenter un horizon (B) rouge semblable à celui des sols fersiallitiques. Comme dans tous ces sols restés calciques ou faiblement calcaires, le profil organique est en effet profond et s'étend à l'horizon (B), d'où la similitude de cet horizon avec le A_3 des sols fersiallitiques.

Ils se distinguent par ailleurs de ceux-ci par leur rapport Fer libre/Fer total plus bas que celui des sols fersiallitiques. Mais il s'agit peut être là simplement d'une différence de lithologie.

Ces sols présentent un intérêt tout particulier dans la compréhension de la pédogénèse dans le midi de la France ; mais leur étude est inachevée. En particulier, un examen plus détaillé des composés du fer mérite d'être entrepris. Des données concernant l'âge de ces sols seraient également très utiles.

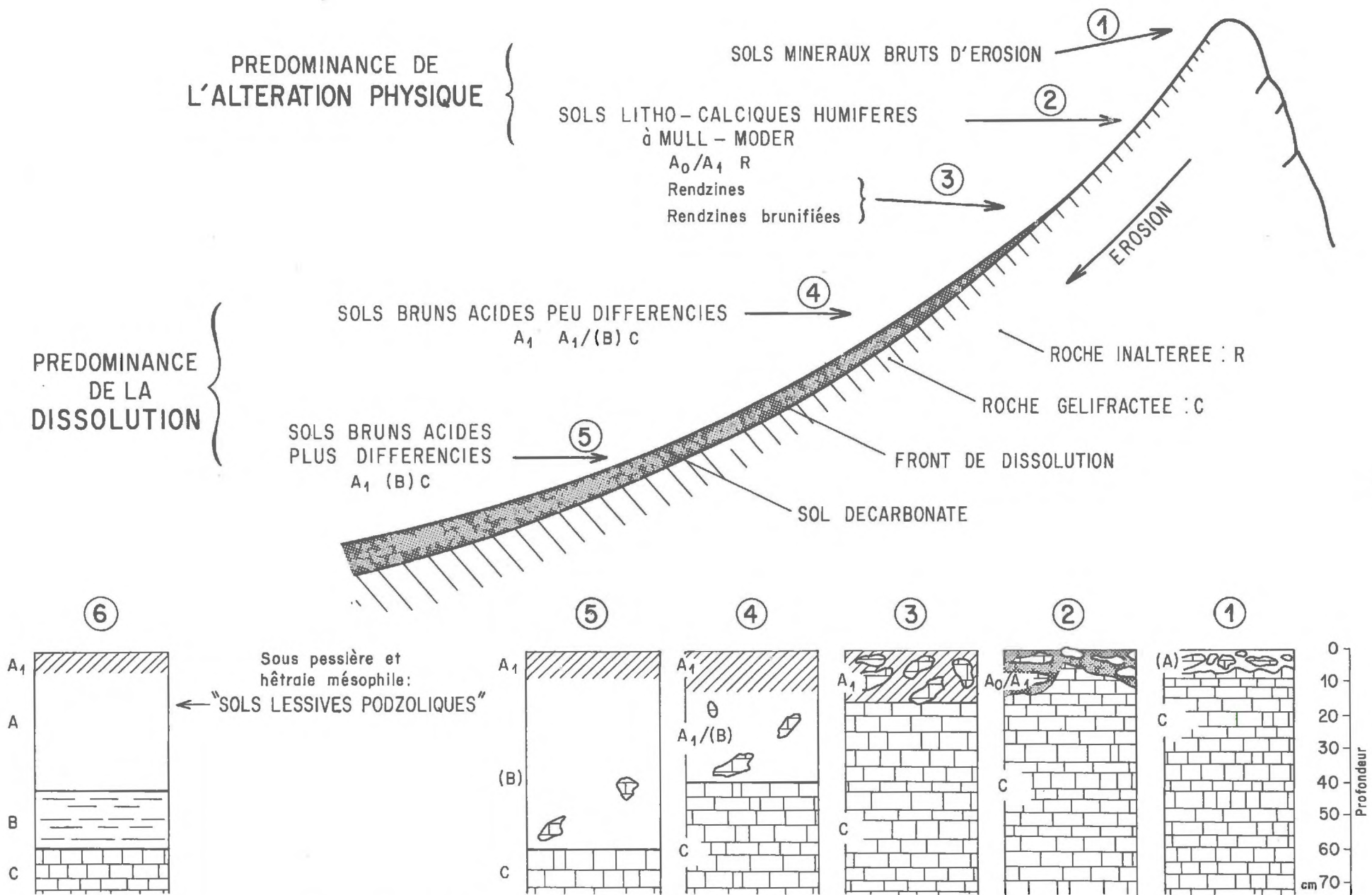


Figure 44 - Schéma de l'évolution des sols dans une toposéquence sur roches-mères calcaires tendres sous les pelouses pseudoalpines .

3.3 - EVOLUTION DES SOLS SUR ROCHES-MERES CALCAIRES TENDRES EN MONTAGNE

Il existe très peu de données bibliographiques, concernant les sols sur calcaires tendres en montagne. Dans le cadre de ce travail, leur étude s'est avérée d'un certain intérêt. Elle a été réalisée, à travers tous les étages bioclimatiques du Vercors et dans la Montagne de Lure. Sur ce matériel et sous ces climats, l'évolution des sols est rapide.

3.31 - SOUS LES PELOUSES ALPINES ET PSEUDOALPINES : LES SOLS BRUNS ACIDES

Examinons d'abord l'évolution des sols sur ces calcaires, sous les pelouses pseudoalpines. Elle est représentée dans la figure 44. Il s'agit là d'un schéma ; il tient compte de l'ensemble des toposéquences qui ont été mises en évidence sous ces pelouses.

Au sommet se trouve un sol minéral brut d'érosion. C'est le profil 1. La pente est très forte et l'altération mécanique l'emporte sur la dissolution. Le milieu est sec et le sol est dépourvu de végétation. Il est remplacé, sur les pentes moins abruptes, par le sol litho-calcaique humifère à mull-moder (fig. 44,2). Ce sol a été étudié, au début de ce travail, sur calcaires durs, sous ces mêmes pelouses. Il se forme par accumulation de matière organique du type mull-moder, entre les cailloux et en absence ou en présence d'une faible quantité d'argiles de décarbonatation. Ici, en effet, c'est encore l'altération mécanique qui l'emporte sur la dissolution. Ces sols se forment à partir de pelouses sèches, encore ouvertes, avec *Gentiana angustifolia* et *Androsace villosa* (RITTER et BOTTNER, 1970). Peu à peu, les pelouses se ferment et le sol se stabilise ; il reste encore très caillouteux (figure 44,3). Mais on assiste à l'accumulation de matériel résiduel, issu du calcaire tendre. Le mull-moder se transforme en mull : sa couleur s'éclaircit et sa structure passe de particulaire à grumeleuse. Le complexe absorbant reste saturé en calcium. La terre fine est parfois encore calcaire. Il s'agit de rendzines ou de rendzines brunifiées. Mais sur calcaires tendres, en montagne, ce stade est bref. Aussi, dans la figure, ces deux types de sols ne sont ils pas soulignés. Au-delà, le sol est définitivement stabilisé, par une pelouse très dense, appelée par RITTER et BOTTNER (1970) : *Sieversieto-meetum*. Quelques espèces acidiphiles y apparaissent déjà. La décarbonatation est très active. Le squelette calcaire disparaît rapidement et le front de dissolution est situé à une profondeur de l'ordre de 40 à 50 cm. En dessous de celui-ci, la roche-mère calcaire tendre est généralement encore très altérée par la gélifraction. Le complexe absorbant des horizons situés au dessus du front est en voie de désaturation ; on assiste à l'ébauche d'un horizon (B) de structure et l'horizon organique s'appauvrit. Il s'agit d'un sol brun acide encore peu différencié (figure 44,4). Sous ces pelouses alpines et pseudoalpines, ce type de sol est très fréquent. La description morphologique d'un exemple de ce sol est présentée ci-après. Peu à peu la végétation devient franchement acidiphile avec l'installation de pelouses à *Nardus stricta*. Le profil organique est de plus en plus mince et de moins en moins foncé. Mais

il reste toujours du type mull. C'est un mull eutrophe, ou plus généralement un mull acide. Dans l'horizon (B) structural, apparaît la couleur ocre. Il s'agit d'un sol brun acide, plus différencié que le précédent (5). Dans les cas les plus favorables, le front s'est stabilisé, à une profondeur de l'ordre du mètre. Dans les horizons A et (B), le complexe absorbant est désaturé. S en % de T peut atteindre des valeurs de l'ordre de 20 à 30 %, mais généralement elles se situent à 50 % et le pH est neutre 5 et 6. Cependant, ces sols, sous les pelouses pseudoalpines ou alpines ne sont pas ou peu lessivés, le stade sol brun acide n'est pas dépassé, quelle que soit la profondeur, à laquelle se trouve le front de décarbonatation.

Voici la description morphologique d'un sol brun acide correspondant dans la figure 44, au n°4 (peu différencié).

Profil V 119, col de Chavanne (Vercors), carte I.G.N. au 1/50 000 feuille de CHARPEY, C.L. x = 841,2 ; y = 287,0 ; altitude 1535 m, sur calcaire tendre du crétacé inférieur, sur plateau, sous une pelouse pseudoalpine avec *Carex sempervirens*, *Calluna vulgaris* et *Globularia cordifolia*.

Hor. A₁₁ : 0 - 15 cm, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique, subanguleuse très fine à fine, consistance dure à l'état sec, couleur état humide 10 YR 3/3, absence de cailloux, racines très abondantes, passage progressif.

Hor. A₁₂ : 15 - 40 cm, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique subanguleuse très fine à fine, consistance dure à l'état sec, couleur état humide 10 YR 4/3, absence de cailloux calcaires, racines très abondantes, passage progressif.

Hor. (B) : 40 - 60 cm, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique subanguleuse fine à moyenne, consistance très dure à l'état sec, couleur état humide 10 YR 5/4, 10 % de cailloux calcaires avec pellicule de dissolution, passage rapide.

Hor. (B)/C : 60 - ... texture argilo-limoneuse, structure polyédrique subanguleuse moyenne à grossière à massive, consistance très dure à l'état sec, couleur état humide 10 YR 5/3, 50 % de cailloux calcaires avec pellicule, à 100 cm 80 % de cailloux.

Dans le sol appelé dans la figure 44 en 5 sol brun acide "plus différencié", la couleur à l'état humide passe à 7,5 YR 5/8 en (B) et à 7,5 YR 4/4 en (B)/C.

Les caractères chimiques de ces sols seront examinés plus amplement dans le prochain paragraphe. La répartition des sols sur calcaires tendres dans les pelouses pseudoalpines et le schéma de la figure 44 méritent encore quelques commentaires :

- La séquence présentée ci-dessus est schématique, comme il a été dit précédemment. Elle est en effet souvent tronquée, soit à la partie supérieure, où d'aussi fortes pentes sont rares sur des calcaires tendres, soit à la partie inférieure, où les sols appelés : bruns acides évolués, sont absents.

- Des cônes de déjection, semblables à ceux sur calcaires compacts sont également souvent observés sur ces pentes.

- Le matériel décarbonaté, situé au-dessus du front, dans les sols bruns acides a deux origines possibles. Dans le cas général, il s'agit incontestablement d'horizons formés sur place. Mais il peut aussi s'agir de matériaux soliflués, décarbonatés à l'amont. Cependant, les bourrelets de solifluxion ne sont pas très fréquents et il semble que l'essentiel du matériel soit issu de la dissolution in situ. Un rôle important, dans cette séquence, est joué par la neige. Celle-ci est balayée à la partie supérieure et accumulée à la partie inférieure. Son effet sur la dissolution des calcaires est bien connu.

3.32 - SOUS LES FORETS SUBALPINES ET MONTAGNARDES : LES SOLS LESSIVES FAIBLEMENT PODZOLIQUES ET LES "SOLS LESSIVES PODZOLIQUES"*)

Les sols plus évolués sont uniquement situés sous forêts. Ils ont été examinés sous la pinède à crochets, la pessière, la hêtraie-sapinière et sous la hêtraie mésophile. Par rapport aux sols des pelouses deux modifications importantes interviennent. D'une part, sous forêts, ces sols sont davantage protégés de l'érosion et des remaniements : la décarbonatation est généralisée, l'altération mécanique et l'érosion sont réduites au minimum, même sur des pentes très fortes. Par ailleurs, ces sols sont généralement lessivés. L'entraînement des argiles et du fer intervient déjà, lorsque le front de dissolution n'est pas encore très profond (de l'ordre de 40 cm). Sur le plan morphologique (figure 44, 6), cela se traduit, par l'apparition d'un horizon B textural, généralement à revêtements argileux, de couleur ocre et d'un horizon A₂ pâli. L'horizon organique est soit du type moder, soit du type mull acide ; celui-ci est toujours très superficiel, peu coloré par la matière organique. Dans les horizons A₂, S/T peut atteindre des valeurs très faibles : de 10 à 20 % et le pH (H₂O) descend, dans les sols les plus évolués, à 5 ou 4. Il s'agit ici, de sols lessivés modaux, de sols lessivés faiblement podzoliques et nous appellerons les sols les plus différenciés : "sols lessivés podzoliques". Une description morphologique d'un exemple de ce dernier type de sol sera donnée à la fin de ce chapitre, page 220.

*) Le terme de "sol lessivé podzolique" n'est pas utilisé par la C.P.C.S. Nous l'utilisons ici provisoirement pour désigner des sols lessivés podzoliques bien différenciés : apparition d'un moder et début de décoloration de l'horizon A₂. (voir description morphologique page 220).

De la pinède à crochets, à la hêtraie mésophile, à travers les étages subalpin et montagnard, il n'a pas été possible de mettre en évidence une séquence évolutive bioclimatique de ces sols. Leur répartition est essentiellement liée à l'aptitude des roches-mères calcaires tendres, à une dissolution plus ou moins rapide. Celle-ci est en effet très variable. Des calcaires durs et purs, aux marnes très argileuses, toutes les transitions ont été observées.

3.33 - LIBERATION ET ENTRAÎNEMENT DES SESQUIOXYDES A TRAVERS CES SOLS

La profondeur, à laquelle se trouve le front, est très variable. Elle conditionne l'évolution du matériel décarbonaté, situé au-dessus. Le stade le moins évolué correspond à la rendzine, le plus évolué au "sol lessivé podzolique" et un grand nombre d'intermédiaires ont été observés. On a là, un matériel d'étude très intéressant, qui a permis d'examiner la succession des phénomènes de pédogénèse, à travers ces sols. Ce paragraphe sera consacré à la migration des argiles, à la libération et à l'entraînement des sesquioxydes. Le suivant traitera de l'altération des minéraux argileux. Enfin, dans un dernier paragraphe, sera examinée la migration de la matière organique.

A la suite du dépouillement des données d'analyses d'une quarantaine de profils sur calcaires tendres, examinés dans le Vercors et la Montagne de Lure, cinq sols ont été sélectionnés et leurs résultats d'analyse représentés dans la figure 45. Ils correspondent à des stades de différenciation croissante, sur roches-mères calcaires tendres en montagne. Il s'agit :

- D'un sol brun calcique, provenant des pelouses pseudoalpines (Profil n° V 120). Il est resté calcique, mais il ne contient plus de réserve calcaire. C'est un stade très transitoire, rarement observé.
- D'un sol brun acide, également sous pelouses pseudoalpines (V 119).
- D'un sol lessivé modal, sous hêtraie-sapinière (V 152).
- D'un sol lessivé faiblement podzolique également sous hêtraie-sapinière (V 158).
- Enfin, d'un "sol lessivé podzolique" (V 71) sous pessière.

Tous les horizons, représentés dans cette figure, sont décarbonatés et dépourvus de réserve calcaire. Ils sont tous situés au-dessus du front de décarbonatation. Les horizons C calcaires, situés sous celui-ci, n'y figurent pas.

Examinons d'abord l'épaisseur des niveaux décarbonatés, c'est-à-dire la profondeur à laquelle se trouve le front. Des sols les moins évolués, en haut de la figure, aux plus évolués, celui-ci se trouve à des niveaux de plus en plus bas. D'une manière générale, l'évolution du sol

est d'autant plus importante, que le front est plus éloigné. Mais d'autres facteurs interviennent et seront présentés ultérieurement.

Dans la colonne de gauche de la figure 45, sont représentés l'état du complexe absorbant (échelle en haut de la colonne) et les valeurs des pH (H_2O) et (KCl) (échelle en bas) (voir légende en bas de la colonne). Le complexe reste saturé dans le sol brun calcique. Sous l'effet du cycle biologique, la courbe des valeurs de S/T se creuse d'abord au niveau des horizons (B), A_2 ou B_1 . Puis, dans le profil le plus évolué (V 71), les plus faibles valeurs de S/T et de pH apparaissent dès la surface. Quel que soit l'état d'évolution du sol, les horizons profonds, proches du front, sont toujours saturés entre 80 et 100 %.

La répartition des argiles, à travers les différents horizons, est représentée dans la colonne de droite. I.E. signifie indice d'entraînement. Dans les deux premiers sols, sous les pelouses pseudoalpines, le lessivage est faible. Il est de 2 et plus, dans les trois autres profils.

Les renseignements les plus précieux sont apportés, par l'avant dernière colonne. Trois paramètres y sont représentés. Le trait plein concerne l'aluminium total ; l'échelle correspondante est en haut de la colonne. Le trait discontinu représente les valeurs de l'aluminium libre ; l'échelle se trouve en bas. Les indices d'entraînement de ces deux éléments sont indiqués le long des droites, sous le signe I.E. Enfin, les valeurs inscrites à l'horizontale correspondent au rapport aluminium libre en % de l'aluminium total (voir légende en bas de la colonne).

Les sols examinés ici sont le point d'interférence de deux phénomènes pédogénétiques : le lessivage et la podzolisation. Examinons les, à travers les paramètres représentés dans la figure. Précisons, que la superposition de ces processus a récemment été étudiée par DUCHAUFOUR et SOUCHIER (1966), dans des sols lessivés faiblement podzologiques sur terrain siliceux.

- Dans le sol brun calcique (V 120) les argiles ne sont pas entraînées. L'aluminium total varie dans une faible proportion. Les rapports Al libre/Al total restent faibles, à travers tous les horizons. Ce sol, à complexe absorbant encore saturé, n'est ni lessivé, ni podzolisé.

- Dans le sol brun acide (V 119), l'illuviation des argiles reste réduite. Cependant, à la différence du sol précédent, Al libre/Al total est déjà plus élevé en A_1 . Dans cet horizon, les argiles sont en voie d'altération. Elles restent intactes en (B), où Al libre/Al total est encore relativement bas.

- Dans le sol lessivé (V 152), deux modifications interviennent. D'une part, les argiles sont fortement entraînées en B_2 et la variation

de Al total est importante. Par ailleurs, le rapport Al libre/Al total est élevé, non seulement en A_2 , mais aussi en B_1 . Il reste encore faible en B_2 . Dans ce sol, le lessivage a permis d'entraîner des argiles non altérées en B_2 . Celles qui subsistent en A_2 et en B_1 sont, par contre, en voie d'altération.

- A partir du sol lessivé faiblement podzolique V 158, deux autres modifications apparaissent. Comme le précédent, ce sol est très lessivé, en argiles ; la variation de l'aluminium total est importante. Mais on constate, à partir d'ici aussi, une illuviation de l'aluminium libre ; son indice d'entraînement est de 1,4 et le "ventre" de Al libre se trouve en B_{12} . Par ailleurs, les valeurs élevées de Al libre/Al total se trouvent ici, à des profondeurs encore plus importantes : elles atteignent B_{12} , situé à 90 cm. Dans l'horizon B_2 par contre, les argiles restent encore relativement peu altérées.

- L'évolution maximale est réalisée dans le dernier profil (V 71). Les caractères essentiels de celui-ci sont les suivants : les variations sont importantes, autant pour l'aluminium total, que pour Al libre. Tous les "ventres" sont situés en B_2 , directement au dessus du front. La valeur maximale de Al libre/Al total est également en B_2 . Elle est ici élevée : 16,5 %. Concernant la variation de ce rapport, à travers ces sols évolués, deux maxima sont en général observés : l'un en B_2 , c'est le résultat de l'illuviation de Al libre, l'autre en A_1 ; il s'agit là, d'ions Al^{+++} échangeables et retenus sur le complexe absorbant de l'horizon organique. Ce sol plus différencié que le précédent a été appelé "sol lessivé podzolique".

En définitive, trois phénomènes successifs sont mis en évidence. Après la décarbonatation et une désaturation partielle du complexe absorbant, on assiste d'abord à une illuviation des argiles. Puis intervient une libération d'aluminium, dans les horizons de surface ; elle s'étend peu à peu en profondeur. Elle est enfin suivie d'une illuviation d'aluminium libre. Dans le cas des sols les plus évolués, le maximum d'argiles, d'aluminium total et libre et les valeurs les plus élevées du rapport Al libre/Al total, sont tous situés dans le même horizon : en B_2 , juste au-dessus du front de décarbonatation. Ces données, concernant l'aluminium, ont un caractère général. Elles ont été observées dans la plupart des profils étudiés sur ces calcaires tendres.

Le comportement du fer, à travers ces sols, est beaucoup plus irrégulier. Un certain nombre de faits se dégagent ; cependant, leur généralisation n'est pas possible. Les résultats sont également donnés dans la figure 45, à la deuxième colonne. Comme pour l'aluminium, le trait plein correspond au fer total, le discontinu au fer libre et le rapport Fe libre, en % de Fe total est écrit horizontalement. Les

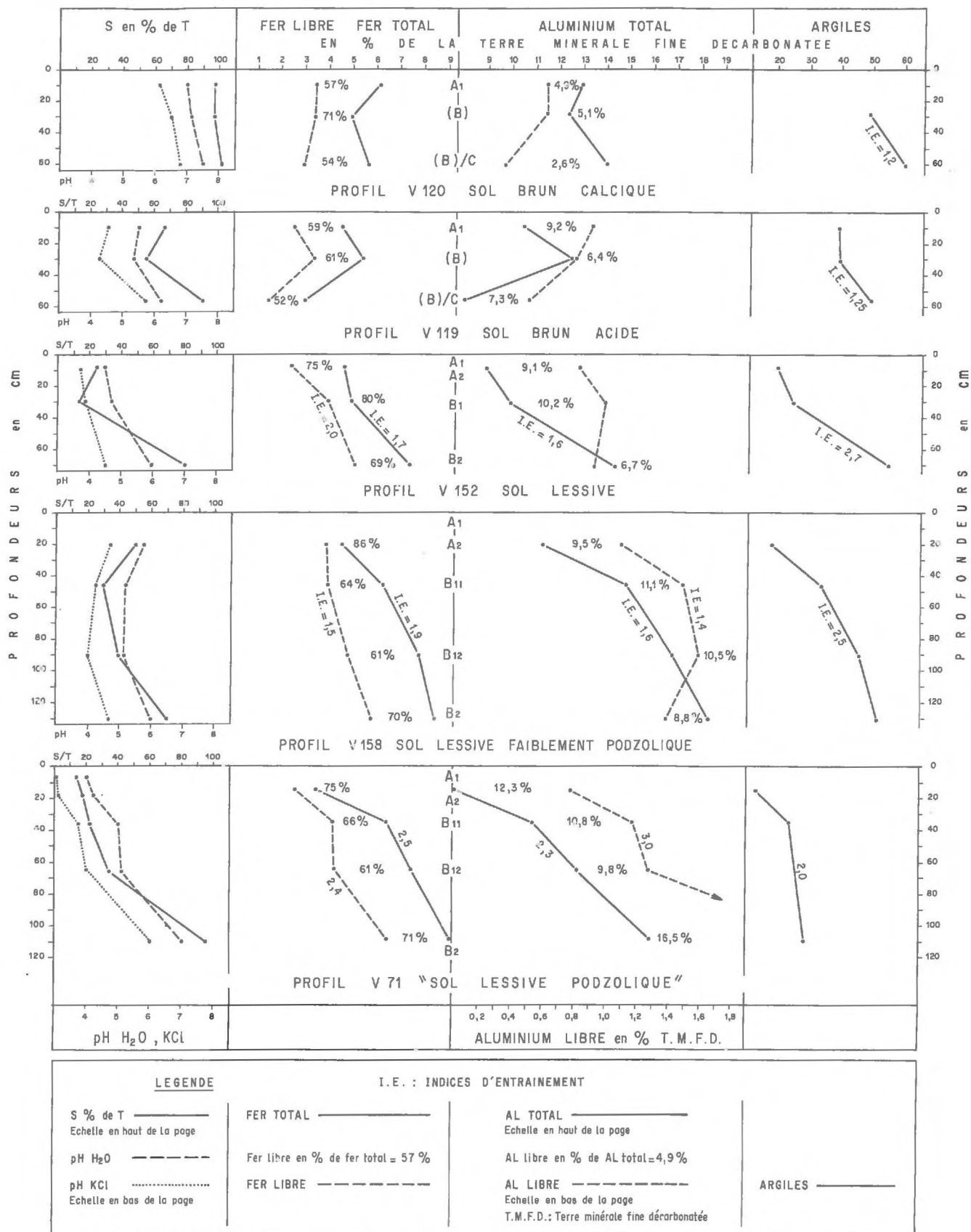


Figure 45 - Evolution des sesquioxydes à travers les sols à complexe absorbant désaturé.

points essentiels, dégagés de ces paramètres sont les suivants :

- A travers les cinq profils, on constate entre A et B une variation de plus en plus importante du fer total. Elle est à peu près identique à celle de Al total.

- L'illuviation du fer libre débute plus tôt, que celle de Al libre. Elle a déjà lieu dans le sol brun acide (V 119). L'indice d'entraînement est élevé dans le sol lessivé V 152 : 2,0, alors que pour Al libre, il n'est probablement pas encore significatif dans ce sol.

- Concernant le fer libre/ fer total deux observations sont à faire. Des sols peu évolués, aux plus évolués, le rapport est de plus en plus élevé. Cette remarque concerne l'ensemble des sols examinés sur calcaires tendres en montagne. Mais, comme nous l'avons dit précédemment, elle souffre de nombreuses exceptions.

- L'autre observation concerne la variation du rapport, à travers le profil. On constate, que dans le sol brun calcique, le brun acide et le sol lessivé, le maximum se situe dans les horizons A₁ ou (B). Dans les sols lessivés podzoliques, ce rapport se comporte de la même manière que Al libre/Al total. Deux maxima sont observés : l'un à la surface du sol, l'autre en B₂.

3.34 - EVOLUTION DES MINERAUX ARGILEUX

Comme pour les sesquioxides, un certain nombre de profils, correspondant à des stades d'évolution croissante, ont été représentés dans la figure 46. Ce sont pour la plupart les mêmes, que ceux qui sont dans la figure précédente. Ils ont été sélectionnés, parmi 24 sols de montagne sur calcaires tendres, dans lesquels les types d'argiles ont été déterminés, par analyse par diffraction des rayons X. La figure est constituée de trois colonnes. Dans celle de droite, sont répétés les trois paramètres concernant l'aluminium. Ce sont les mêmes, que ceux de l'avant dernière colonne de la figure 45. La colonne centrale représente la proportion des différents types d'argiles. Leur répartition dans le profil est également exprimée, dans la première colonne. La légende de celle-ci se trouve tout à fait à gauche de la figure 46.

Considérons d'abord les roches-mères : les horizons C, situés sous le front de décarbonatation. Dans ces calcaires tendres du crétacé inférieur du Vercors, le minéral le plus fréquent est un interstratifié gonflant du type 14_V - 14_M. Sa présence est exclusive dans les profils V 119 et V 27 ; elle prédomine sur une faible quantité d'illite (10 %), dans les autres profils. Seul le dernier (V 71) est constitué d'une argile plus proche de la montmorillonite : (10 - 14_M) - M, qui domine également sur l'illite.

Quel que soit le minéral argileux présent dans la roche-mère : édifices gonflants ou illite, on observe dans le sol une évolution vers la vermiculite par l'intermédiaire d'interstratifiés du type I-(10-14V)-V.

Appelons, que ce même type d'évolution avait déjà été observé dans les sols de montagne sur calcaires compacts (chapitre VI, page 173). Il s'agit d'une vermiculitisation.

La formation de vermiculite, représente le terme de l'évolution dans ces milieux. Ce stade n'est atteint, que dans les horizons supérieurs des sols les plus évolués. Dans les profils, où la pédogénèse est moins avancée, on aboutit à des stades intermédiaires.

Examinons les différentes étapes dans la figure 46.

- Dans le sol brun calcique (V 120), où l'aluminium total n'est pas entraîné et où le rapport Al libre/Al total reste faible, les argiles ne sont pas altérées. Les édifices $14_v - 14_m$ et l'illite sont conservés intégralement, à travers tous les horizons.

- Dans le profil suivant (V 119) : le sol brun acide, le complexe absorbant est en voie de désaturation et le rapport Al libre/Al total atteint 9,27 en A_1 . Cependant les argiles, également du type gonflant $14_v - 14_m$, ne varient pas non plus, à travers tout le profil.

Le sol brun acide (V 27) est un autre cas. Comme les deux précédents, il est situé sous les pelouses pseudoalpines : il n'est donc pas lessivé, mais il est plus évolué. Les minéraux $14_v - 14_m$ sont transformés en vermiculite, en présence d'une faible quantité d'interstratifiés non gonflants et de kaolinite-chlorite. Cette évolution est progressive. Elle n'a pas lieu dans l'horizon P/C encore saturé.

- Le profil V 152 constitue également une bonne illustration. C'est un sol lessivé non podzologique : les indices d'illuviation des argiles et de Al total sont élevés. Mais l'aluminium libre n'est pas entraîné. Le rapport Al libre/Al total est élevé en A_2 et B_1 non encore en B_2 . La minéralogie des argiles confirme ces données : de l'horizon C à B_2 , très peu de modifications interviennent. Ce dernier est un horizon illuvial d'argiles non encore altérées. Celles qui subsistent en B_1 et A_2 , par contre, sont transformées. On arrive au stade interstratifiés non gonflants : I - $(10-14_v) - V$.

- Dans le sol lessivé faiblement podzologique (V 157), on assiste à une illuviation de tous les éléments. Les "ventres" se superposent tous en B_2 . C'est là aussi que se trouve le maximum de Al libre/Al total. Dans ce sol, les minéraux argileux sont aussi plus évolués, que dans le précédent. Tous les édifices du type $14_v - 14_m$ et l'illite sont transformés, dès l'horizon B_2 , en interstratifiés I - $(10-14_v) - V$. Dans les horizons encore plus acides : B_1 et A_2 , le stade vermiculite est atteint.

- Une évolution comparable est observée dans le "sol lessivé podzologique" V 71. Comme précédemment, tous les éléments sont illuviés en B_2 et Al libre/Al total est ici très élevé : 16,5 %. La roche-mère de ce sol contient des minéraux du type $(10-14_v) - V$ et une illite. Le stade vermiculite est également atteint en B_1 et A_2 ; une phase intermédiaire, qui contient déjà 45 % de vermiculite, est observée en B_2 . Ce sol est encore plus évolué que le précédent.

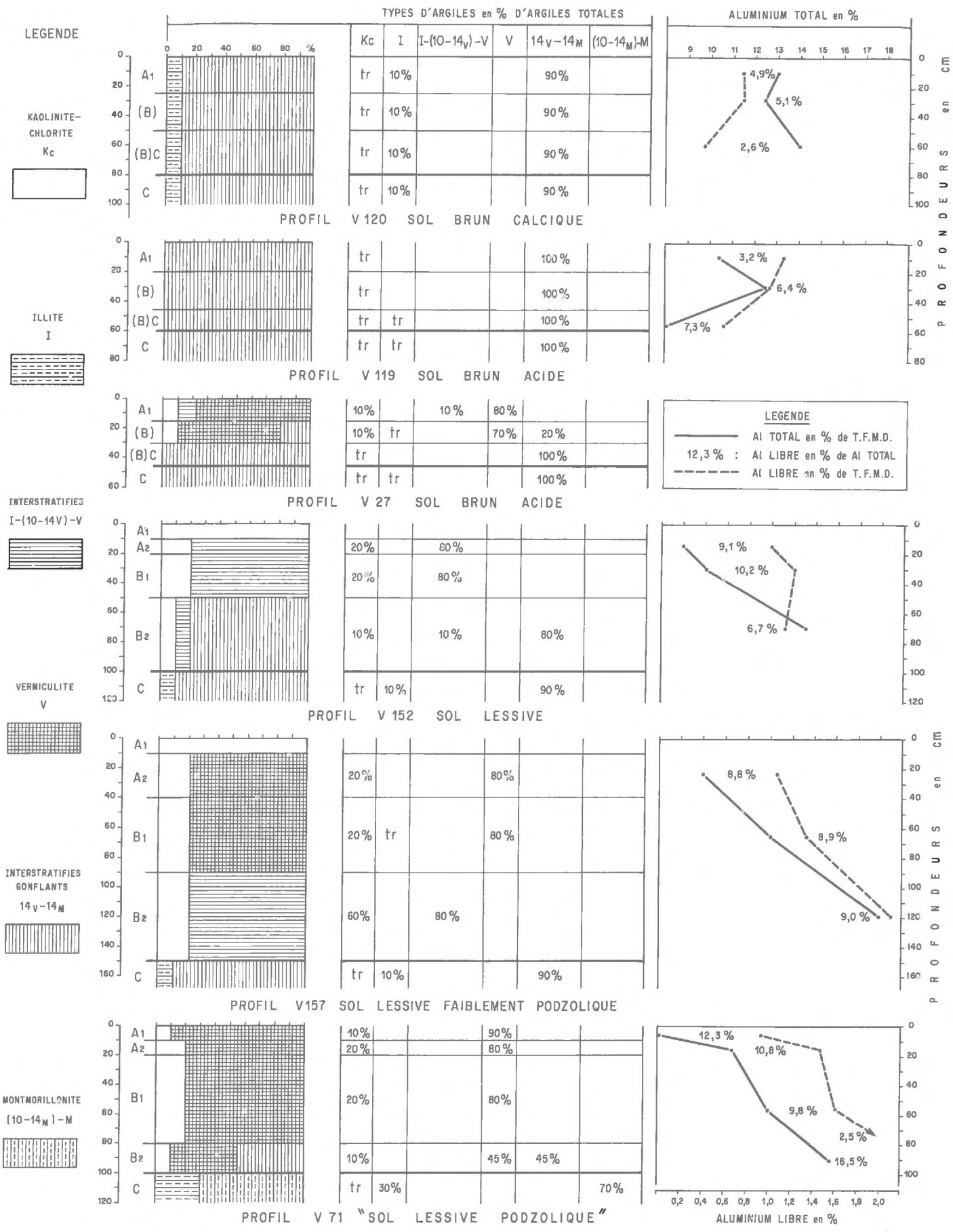


Figure 46 - Evolution des minéraux argileux à travers les sols à complexe absorbant désaturé.