

## ETUDE DE QUATRE SEQUENCES SOL-VEGETATION A L'ETAGE ALPIN

par F. BARTOLI et G. BURTIN (1)

Introduction.....	80
I.- Stations et méthodes.....	80
II.- Evolution stationnelle sol-végétation.....	82
III.- Evolution de la matière minérale.....	83
IV.- Evolution de la matière organique.....	86
Conclusion.....	89
Bibliographie.....	90
Annexe: fiche analytique des sols alpins types.....	92

RESUME.- Les sols alpins, de versant sud, sont peu évolués sur roche-mère dure (granite ou calcaire massif), ils le sont par contre sur roche-mère tendre (gneiss ocellaire ou calcschiste) avec tendance à la brunification. Les deux principaux facteurs déterminant la pédogenèse sont, d'une part, la végétation de pelouse climacique à bas rapport C/N, d'autre part, la roche-mère par l'intermédiaire du calcium, des argiles et du fer amorphe. Le drainage, processus important à l'étage alpin, enrichissant les profils en argile et en fer amorphe et les appauvrissant en calcium échangeable, favorise, de ce fait, la biodégradation du matériel végétal, potentiellement labile.

Ces facteurs végétation-roche-mère-topographie expliqueraient la tendance fréquente à la brunification des sols alpins.

SUMMARY.- The alpine soils, on south slope, are shortly developed on hard rock parent material (granit or massive calcstone); on the contrary they are quite alpine brown soils on soft rock parent material (ocellate gneiss or calcschist). In the alpine level, the two main pedogenetic factors are on one hand the climacic alpine meadow with low C/N and on the other hand the rock parent materials with their different amounts of calcium, clays and amorphous iron. The drainer, important process at the alpine level, enrich the soils in clays and amorphous iron and emaciate them in exchangeable calcium. The result is that the drainer favors the biodegradation of the vegetal material, potentially brittle.

These vegetation-rock parent material-topography factors would explain the frequent tendency to the brunification process of the alpine soils.

(1) Centre de Pédologie biologique, C.N.R.S., B.P.5, 54500 Vandoeuvre.

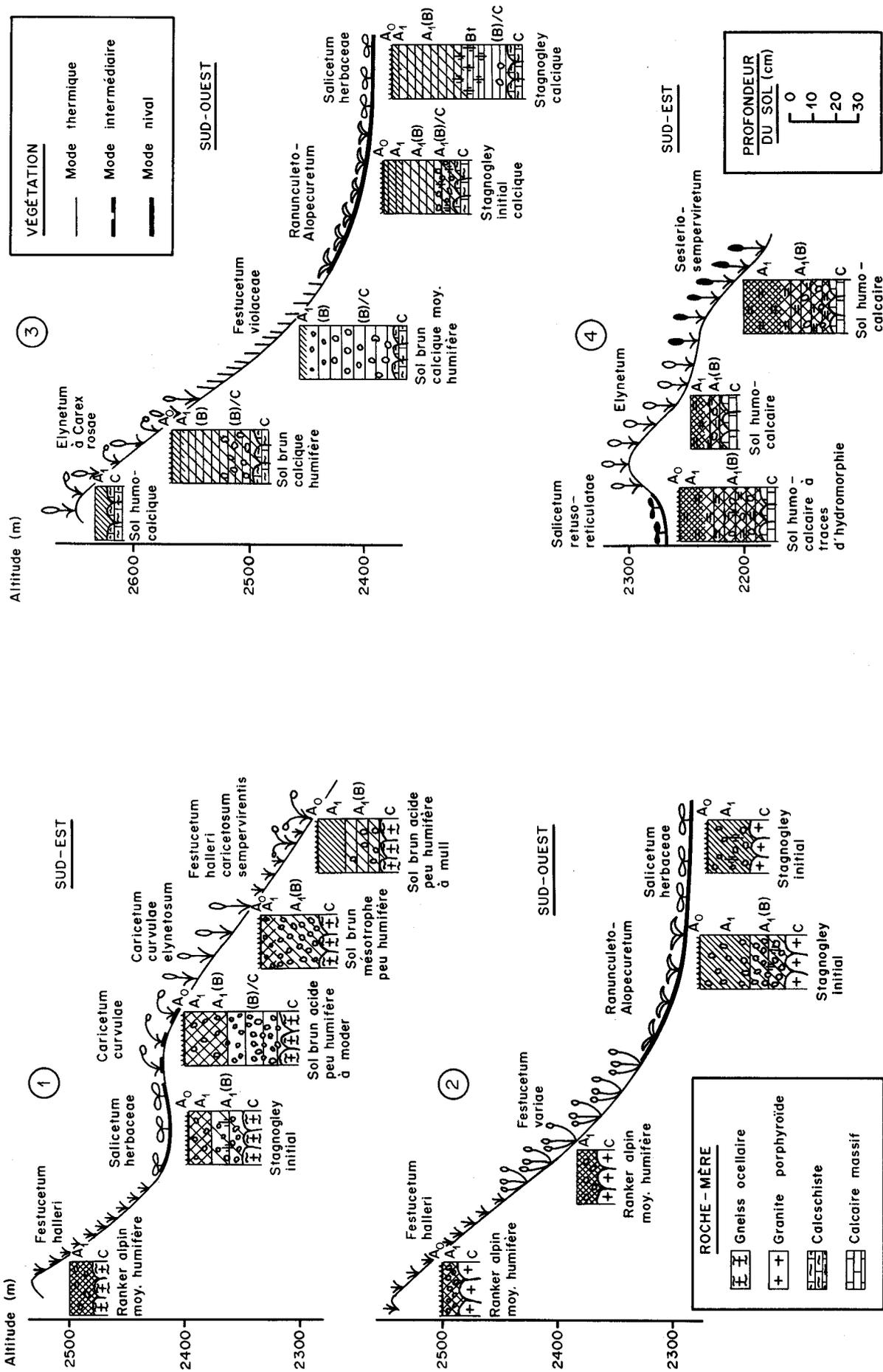


Fig.1.- Séquences sol-végétation de l'étage alpin :

- 1 - séquence des Grandes Autannes (massif du Mont-Blanc) sur roche siliceuse tendre (gneiss du Pelvoux)
- 2 - séquence de Pétarel (Valgaudemar, massif du Pelvoux) sur roche siliceuse dure (granite porphyroïde)
- 3 - séquence de Vallompierre (Valgaudemar, massif du Pelvoux) sur roche calcaire tendre (calcschiste)
- 4 - séquence de Balme (massif du Mont-Blanc) sur roche calcaire dure (calcaire massif).

ROCHE - MÈRE	
	Gneiss ocellaire
	Granite porphyroïde
	Calcschiste
	Calcaire massif

PROFONDEUR DU SOL (cm)	
	0-10
	10-20
	20-30

## INTRODUCTION

Un même étage de végétation présente des différences marquées selon qu'il se situe dans les Alpes externes, humides, ou les Alpes internes, sèches. Il existe toutefois une exception : à l'étage alpin, où ces différences s'estompent du fait de la relative uniformité du climat, les mêmes associations prairiales se retrouvent tout au long de l'arc alpin (FAVARGER, 1974).

Le concept de "sols analogues" de PALLMANN (1947) s'applique particulièrement bien aux sols alpins : il y a, à cet étage, convergence des types d'humus (mull-modér alpin, C/N 10 à 15) en équilibre avec la pelouse alpine climacique, et les sols ne diffèrent que par leurs horizons inférieurs dont les caractères types dépendent essentiellement de la topographie et des roches-mères, (BRAUN-BLANQUET et JENNY, 1926; DUCHAUFOR et GILOT, 1966; Acad. Rep. Soc. Romania, 1969; LABROUE 1971-1976; VERGER, 1974; CABIDOUCHE, 1976; GENSAC, 1977).

L'étude de quatre séquences de sols dans les massifs du Pelvoux et du Mont-Blanc confirme cette zonation bioclimatique (climax climatique) tout en précisant le rôle des facteurs stationnels dans la différenciation pédogénétique (climax stationnel).

## I. STATIONS ET METHODES

### A - STATIONS

Nous avons choisi quatre chaînes de sols en versant Sud-Est ou Sud-Ouest, situées dans le massif du Mont-Blanc (Alpes du Nord) et dans le Sud du massif du Pelvoux (Alpes du Sud) sur quatre types de roche-mère (fig. 1):

- sur roche-mère siliceuse tendre (gneiss ocellaire : roche cataclastique où de petites amandes ovoïdes feldspathiques ou quartzo-feldspathiques de quelques millimètres de long sont moulées par une trame phylliteuse très fine (BELLIERE, 1958; VITEL, 1965; VON RAUMER, 1971) : séquence des Grandes Autannes (2 600-2 300 m), massif du Mont-Blanc,

- sur roche-mère siliceuse dure (granite porphyroïde pauvre en calcium et magnésium (LE FORT, 1973) : séquence de Pétarel (2 500-2 300 m), Valgaudemar, massif du Pelvoux,

- sur roche-mère calcaire tendre (calcschistes liasiques : alternance de strates décimétriques de calcaire et de schiste marno-calcaire) : séquence de Vallompierre (2 600-2 400 m), synclinal de Vallompierre, Valgaudemar, massif du Pelvoux,

- sur roche-mère calcaire dure (calcaire liasique massif) : séquence de Balme (2 300-2 200 m), synclinal de Chamonix, massif du Mont-Blanc.

A la suite d'AUBERT *et al.* (1965) et de DALMAS (1972), nous avons classé les groupements végétaux de l'étage alpin en fonction de la température et de la durée d'enneigement (fig. 1) :

- végétation de mode nival (6 à 9 mois d'enneigement),
- végétation de mode thermique (3 à 6 mois d'enneigement),
- végétation de mode intermédiaire.

La dénomination des sols correspondants est établie selon la classification écologique des sols de DUCHAUFOR (1976).

### B - METHODES

La plupart des méthodes utilisées sont décrites dans les ouvrages de DUCHAUFOR (1970, 1976).

Les composés humiques sont extraits, sur la fraction humifiée ( $d > 1,8$ ) au pyrophosphate de sodium (3 extractions successives avec floculation des argiles au sulfate de potassium).

Le fer amorphe est extrait par le réactif de Tamm (DUCHAUFOR *et al.*, 1979). Ce serait, selon BLUME et SCHWERTMANN (1969), le réactif spécifique du fer "actif" des sols, préservant de la dissolution les oxydes et oxyhydroxydes cristallisés de fer.

Les éléments échangeables sont déterminés au pH du sol et ont ainsi une signification écologique précise (qu'ont beaucoup moins les éléments échangeables à pH 7), la nutrition minérale des plantes étant fortement influencée par la proportion réelle existant entre "bases" échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) et les ions  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{H}^+$  (CHIRITA, 1974; GUILLEMIN *et al.*, 1978; ROUILLER *et al.*, 1979).

La valeur  $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{KCl}_\text{N}) - \text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  permet de caractériser les propriétés de surface des particules organo-minérales du sol : lorsqu'elle est nulle, le point de charge nulle (ZPC) est atteint : les surfaces des particules du sol portent autant de charges négatives que de charges positives, ce qui induit une tendance à la floculation. Lorsque pH prend une valeur négative, une plus grande quantité d'hydroxyles quittera la solution pour s'absorber sur les particules alors chargées négativement, d'où une tendance à la dispersion et à la migration (MEKARU et UEHARA, 1972; HERBILLON, 1974; ROUILLER *et al.*, 1979).

## II. EVOLUTION STATIONNELLE SOL-VEGETATION (fig.1 et 2)

### 1. Caractères communs aux sols alpins

Certains caractères - déjà notés par DUCHAUFOR et GILOT (1966), les pédologues roumains (1969), LABROUE (1971 et 1976), GENSAC (1977) - sont communs à la plupart des sols alpins étudiés :

- teneur assez élevée en matière organique (5 à 20 %) (sols moyennement "humifères"), très bonne incorporation de celle-ci dans le profil, liée à l'enracinement profond des graminées des pelouses alpines;
- rapport C/N assez bas (10 à 16) et structuration biologique généralement assez bonne : ceci s'expliquerait essentiellement par la nature du matériel végétal se décomposant (graminées et cypéracées), secondairement par l'activité rhizosphérique des graminées et par les contrastes climatiques existant à l'Alpin.

### 2. Sols stationnels

Les groupements pionniers à *Salicetum retuso-reticulatae* et *Dryas* et à *Seslerietum elynetosum* associés aux sols humo-calcaires constituent des groupements stationnels significativement liés à des humus de type moder calcique alpin (C/N proche de 18, près de 15 % de C, saturation, présence de  $\text{CaCO}_3$  actif), développés sur roche calcaire dure (séquence de Balme) (fig. 1 et 2).

Nous avons confirmé cette correspondance dans la région du col du Lautaret (massif du Pelvoux).

### 3. Sols d'érosion

Par opposition à ces sols peu évolués liés à un type très particulier de roche-mère, les sols d'érosion (rankers alpins sous *Festucetum halleri* ou sol humo-calcaire sous *Elynetum* à *Carex rosae*) sont moins humifères (5 à 10 % de C), ne sont pas carbonatés et ont une assez bonne activité biologique liée à la pelouse alpine climacique (fig. 1 et 2).

### 4. Sols climaciques

Le long des toposéquences, ces sols d'érosion passent très vite à des sols brunifiés en équilibre avec la pelouse alpine de mode thermique (à l'exception des sols peu différenciés sur granite), puis, en bas de pente, à des sols hydromorphes associés aux végétations de combes à neige (fig. 1).

Ces passages séquentiels induisent les processus suivants (fig. 2) :

- enrichissement en argiles et corrélativement en fer amorphe,
- tendance à l'acidification (baisse du rapport 100 S/CEC au pH du sol) essentiellement due à la dissociation des groupements carboxyliques libres  $\text{COOH}$ .

Dans les combes à neige, les sols climaciques sont des stagnogleys à *Ranunculeto-Alopecuretum gerardi* et à *Salicetum herbaceae*. En conditions drainées, ce sont des sols bruns calciques humifères à *Elynetum* à *Carex rosae* et à *Festucetum*

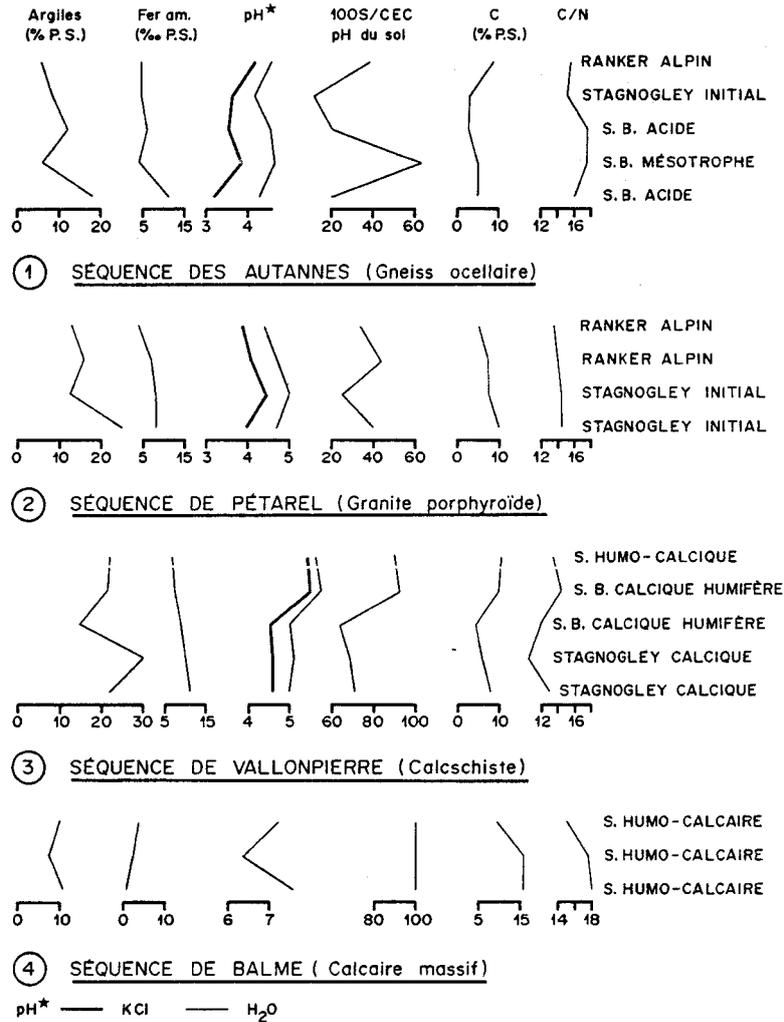


Fig.2.- Evolution des principaux caractères minéralogiques, physico-chimiques et biochimiques des humus des quatre séquences de sols étudiées.

*violacea* sur roche calcaire tendre, des sols bruns acides peu humifères à *Caricetum curvulae* et à *Festucetum halleri-caricetosum sempervirentis*, voire des sols bruns mésotrophes peu humifères à *Caricetum curvulae elynetosum* sur roche siliceuse tendre (fig. 1).

### 5. Fiches analytiques des sols types

Elles figurent en annexe, notamment ranker alpin à caractère moyennement humifère et sol brun acide alpin.

## III - EVOLUTION DE LA MATIERE MINERALE

Nous avons essayé de suivre le degré d'évolution de la matière minérale par trois voies :

- granulométrique
- géochimique
- minéralogique

## 1. Granulométrie et type de roche-mère

La figure 2 nous montre que la teneur en argiles - et corrélativement en fer amorphe - augmente des calcaires massifs aux calcschistes, en passant par les gneiss puis les granites.

Afin de ne pas tenir compte des effets de dilution de la matière minérale par la matière organique en surface, nous avons exprimé l'analyse granulométrique des humus en pour cent de terre fine minérale (fig. 3). Ceci permet d'individualiser quatre types de texture :

- limono-sableuse pour les roches siliceuses (granite et gneiss)
- limoneuse pour les calcaires massifs
- argilo-limoneuse pour les calcschistes.

L'analyse granulométrique révèle par ailleurs une teneur en argiles nettement plus élevée dans les humus que dans les horizons sous-jacents. Cette forte argilogenèse, déjà notée pour les sols alpins du Pic du Midi de Bigorre par LABROUE (1971, 1976), dénote l'importance des processus d'altération d'origine biologique par rapport aux désagrégations physiques.

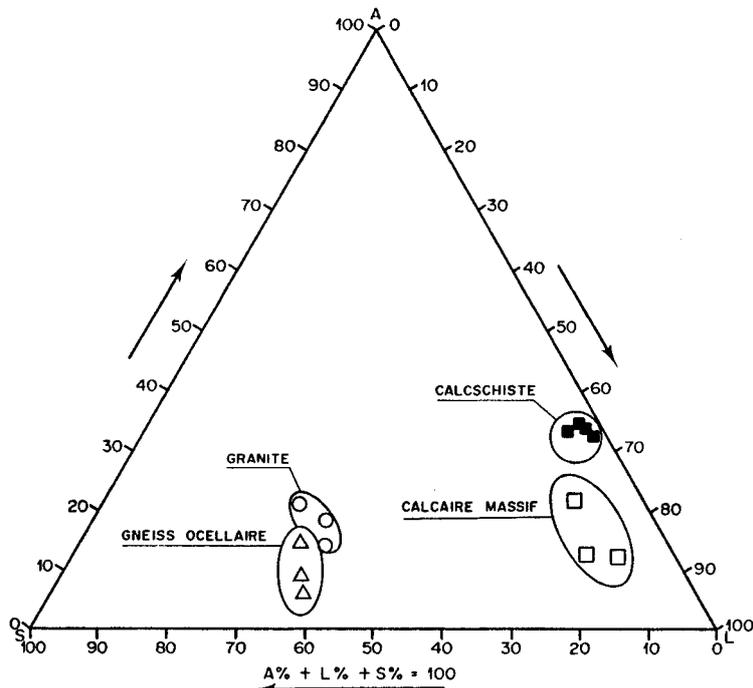


Fig.3.- Analyses granulométriques minérales des humus en fonction du type de roche-mère.

## 2. Evolutions géochimiques

- Sols sur gneiss ocellaire (tabl. I).

L'évolution géochimique est peu prononcée : les éléments sont relativement stables, à part le calcium, labile.

- Sols sur granite (tabl. I).

Les seuls éléments labiles sont le calcium, le sodium et le potassium.

- Sols sur calcaire (tabl. II).

Les éléments alcalino-terreux sont extrêmement labiles.

Le fait que le fer soit l'élément de loin le plus stable (plus forte augmentation de la roche-mère à l'humus) prouve que le fer est souvent immobilisé en milieu calcaire et calcique (même à l'état réduit).

Sur calcschiste, l'humus, par sa teneur élevée en argiles, joue enfin un rôle tampon vis-à-vis du calcium intensément recyclé par la végétation (graminées).

TABLEAU I.- Analyses chimiques totales (exprimées en ‰ P.S. terre minérale) des sols des séquences des Grandes Autannes et de Pétarel (roches acides).

Séquence	Sol - horizon		‰ terre minérale									Perte au feu (‰ PS)	
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O		
Grandes Autannes (gneiss ocellaire)	Ranker alpin ( <i>Festucetum halleri</i> )	A <sub>1</sub>	691,9	166,3	40,6	13,3	5,8	6,3	0,4	27,3	48,2	210,3	
		R	743,0	130,5	32,9	10,9	16,9	5,0	0,5	26,3	33,0	11,0	
	Stagnogley initial ( <i>Salicetum herbaceae</i> )	A <sub>1</sub>	718,4	161,9	35,3	11,6	7,7	8,0	0,3	26,8	29,6	92,1	
		A <sub>1</sub> (B)	714,0	155,7	39,7	12,9	7,5	5,4	0,4	26,8	37,6	70,3	
		R	743,0	130,5	32,9	10,9	16,9	5,0	0,5	26,3	33,0	11,0	
	Sol brun acide ( <i>Caricetum curvulae</i> )	A <sub>1</sub>	713,9	160,5	35,4	10,4	5,5	10,0	0,3	26,9	37,6	98,5	
		A <sub>1</sub> (B)	703,8	154,6	39,4	13,0	6,4	8,5	0,4	28,8	44,8	60,3	
		(B)/C	676,4	162,3	45,3	17,2	14,0	10,4	0,6	28,1	45,8	42,1	
		R	743,0	130,5	32,9	10,9	16,9	5,0	0,5	26,3	33,0	11,0	
	Sol brun mésotrophe ( <i>Caricetum curvulae elynetosum</i> )	A <sub>0</sub>	686,0	157,3	38,4	14,3	24,7	7,3	1,2	28,5	42,1	425,4	
		A <sub>1</sub>	720,2	149,9	34,6	12,0	7,0	5,7	0,5	28,7	40,3	121,8	
		A <sub>1</sub> (B)	731,0	146,2	33,8	11,7	6,9	5,5	0,5	27,7	39,9	95,5	
		R	743,0	130,5	32,9	10,9	16,9	5,0	0,5	26,3	33,0	11,0	
	Pétarel (granite porphyroïde)	Stagnogley initial ( <i>Ranunculeto-Alopecuretum</i> )	A <sub>1</sub>	711,4	162,4	44,5	13,5	2,1	5,7	0,5	21,3	38,8	300,2
			A <sub>1</sub> (B)	711,6	159,6	34,5	13,1	2,2	5,4	0,3	29,6	44,2	75,5
R			713,3	149,5	26,9	11,0	8,0	4,3	0,4	32,6	54,0	12,3	
Stagnogley initial ( <i>Salicetum herbaceae</i> )		A <sub>1</sub>	650,1	202,0	58,1	21,9	3,6	9,7	0,6	19,8	33,9	278,1	
		R	713,3	149,5	26,9	11,0	8,0	4,3	0,4	32,6	54,0	12,3	

### 3 - Evolutions minéralogiques (rayons X)

#### - Sols sur gneiss ocellaire.

Les fractions limoneuses, essentiellement composées de quartz, de feldspath, de biotite et de trace de chlorite, sont directement héritées de la roche-mère.

Les argiles évoluent selon le schéma suivant :

illite → interstratifiés illite-vermiculite → vermiculite alumineuse avec augmentation de la teneur en aluminium échangeable (annexe) .

Les illites qui n'évoluent pas s'amorphisent au cours de l'altération. Ainsi, l'indice de cristallinité de Kubler : largeur du pic à mi-hauteur mesuré sur l'échantillon glycolisé (CHAMLEY, 1971) augmente de 4,2 à 6,5 de l'horizon (B)/C à l'humus du sol brun mésotrophe sous *Caricetum curvulae elynetosum*.

#### - Sols sur calcschiste.

Les fractions limoneuses sont composées de minéraux primaires résiduels : quartz, feldspath, biotite et chlorite.

Les fractions argileuses sont toujours composées d'illite et de chlorite avec des traces de quartz. Non seulement les illites ne se dégradent pas, mais elles ne s'amorphisent pas au cours de l'altération.

Dans le stagnogley calcique, nous avons enfin détecté des traces de lépidocrocite, ce qui est la preuve que le fer s'est non seulement redistribué dans le profil (§ 2), mais qu'il s'est organisé sous forme d'hydroxyde néoformé.

En conclusion, il ressort de toutes ces données, que l'altération est ménagée à l'étage alpin.

TABLEAU II.- Analyses chimiques totales (exprimées en ‰ P.S. terre minérale) des sols, des séquences de Vallompierre et de Balme (roches calcaires)

Séquence	Sol - horizon	‰ terre minérale									Perte au feu (‰ PS)
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
Vallompierre (calcschiste)	Sol brun calcique humifère ( <i>Elynetum</i> à <i>Carex rosae</i> )										
	A <sub>1</sub>	718,5	142,0	60,5	25,9	12,9	7,6	3,0	8,8	21,0	329,9
	(B)	732,4	135,5	53,6	33,9	3,5	6,6	2,2	7,8	24,6	85,4
	(B)/C	749,6	126,7	54,6	23,8	5,2	8,1	2,3	8,7	20,9	140,0
	R	353,0	28,2	11,1	8,4	558,6	2,9	0,2	37,0	51,8	311,3
	Sol brun calcique humifère ( <i>Festucetum violaceae</i> )										
	A <sub>1</sub>	769,4	117,8	48,1	27,6	2,2	7,2	0,7	6,6	19,8	144,2
	(B)	774,6	112,8	49,5	23,7	1,3	8,4	3,3	6,0	21,1	51,1
	(B)/C	752,2	120,1	53,3	29,8	5,3	8,4	1,9	6,7	23,0	42,8
	R	353,0	28,2	11,1	8,4	558,6	2,9	0,2	37,0	51,8	311,3
	Stagnogley initial calcique ( <i>Ranunculeto-Alopecuretum</i> )										
	A <sub>1</sub>	733,4	138,4	58,9	24,0	7,1	8,2	2,3	7,9	19,9	259,5
	A <sub>1</sub> (B)	763,5	117,0	59,6	18,9	2,3	7,8	5,6	7,9	17,3	97,0
	A <sub>1</sub> (B)/C	774,7	107,6	54,3	11,4	1,4	6,4	15,6	11,3	17,2	65,9
	R	353,0	28,2	11,1	8,4	558,6	2,9	0,2	37,0	51,8	311,3
	Stagnogley calcique ( <i>Salicetum herbacaea</i> )										
	A <sub>1</sub>	655,6	198,7	75,7	22,0	6,6	10,8	0,9	10,8	18,9	274,2
	A <sub>1</sub> (B)	652,0	205,7	75,3	20,2	1,3	10,1	0,8	11,0	23,4	103,4
	B <sub>t</sub>	663,0	201,1	69,6	18,8	1,3	11,0	1,1	11,0	22,9	84,6
	(B)/C	644,8	206,3	75,2	22,3	1,9	10,7	1,0	11,8	25,8	65,1
R	353,0	28,2	11,1	8,4	558,6	2,9	0,2	37,0	51,8	311,3	
Balme (Calcaire massif)	Stagnogley humo-calcaire à trace d'hydromorphie ( <i>Salicetum retuso- reticulatae</i> )										
	A <sub>1</sub>	756,7	118,5	38,3	7,3	45,6	9,1	0,2	10,6	13,3	429,6
	A <sub>1</sub> (B)	807,1	97,5	33,0	5,5	30,3	4,3	0,2	6,7	15,2	77,4
	R	352,3	27,9	10,9	8,4	557,8	2,9	0,2	36,7	52,1	317,5
	Sol humo-calcaire ( <i>Elynetum</i> )										
	A <sub>1</sub>	823,8	91,0	28,9	6,8	25,6	4,4	0,4	7,7	10,8	
	A <sub>1</sub> (B)	836,2	87,6	27,0	5,0	21,0	4,5	0,2	7,5	11,1	
	R	352,3	27,9	10,9	8,4	557,8	2,9	0,2	36,7	52,1	317,5
	Sol humo-calcaire ( <i>Seslerio semperviretum</i> )										
	A <sub>1</sub>	645,9	132,9	62,7	13,8	112,6	7,4	0,7	11,3	13,5	
	A <sub>1</sub> (B)	687,3	132,7	46,4	12,2	83,4	9,4	0,3	10,0	17,6	
	R	352,3	27,9	10,9	8,4	557,8	2,9	0,2	36,7	52,1	317,5

#### IV. EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE

##### 1. Teneur en matière organique

Le carbonate de calcium, et même en milieu désaturé le calcium échangeable, freine la minéralisation du carbone (fig. 4).

Il semble que le carbonate de calcium puisse jouer un rôle mécanique de séquestration de la matière organique (CHOULIARAS, 1975), inhibant ainsi sa biodégradation.

Le calcium échangeable, en venant se fixer sur des groupements fonctionnels carbonés libres, les empêcherait de s'associer entre eux par condensation oxydative.

En fait, comme nous l'avons noté précédemment, les profils étant très vite désaturés par l'effet du drainage, la plupart des sols alpins de versant sud ne sont que peu à moyennement humifères.

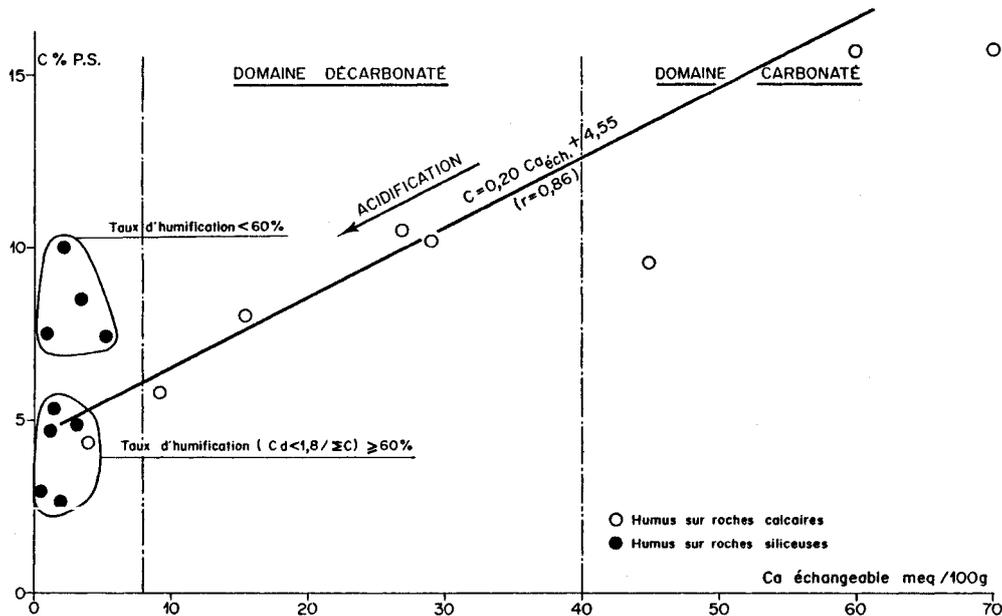


Fig.4.- Contrôle de la minéralisation du carbone par le calcium échangeable : relation teneur en carbone organique-calcium échangeable dans les humus.

## 2 - Composés humiques

Le taux d'extraction au pyrophosphate de sodium du carbone et des métaux associés des fractions humifiées ( $d > 1,8$ ) augmente de manière remarquable avec l'acidification (fig. 5 et 6) (2).

Le rapport  $Fe + Al/C$  des composés humiques étant souvent inférieur à 0,3 montre que les métaux extraits au pyrophosphate de sodium seraient complexés avec la matière organique (GRIFFITH et SCHNITZER, 1976).

L'acidification provoquée pour un type de roche-mère par un lessivage du calcium, entraînerait, par acidocomplexolyse (PEDRO, 1979), la migration d'une partie du fer et de l'aluminium du réseau vers la surface où, en position échangeable, ils flocleraient efficacement la matière organique sous forme de composés humiques (ANDREUX, 1978).

## 3 - Degré de polycondensation de la matière organique

Le degré de polymérisation de la matière organique est inversement fonction du rapport C/N, le type de matériel végétal étant assez semblable en milieu alpin (3).

Ce degré de polymérisation de la matière organique semble étroitement contrôlé par la teneur en fer amorphe ( $C/N - Fe_{am} : r = -0,69$ ) (fig. 8) et encore plus par le rapport fer amorphe sur fer total (fig. 7) (4).

Ceci confirme, pour les sols de pelouse alpine, les travaux du Centre de Pédologie biologique (SOUCHIER, 1971; DUCHAUFOR, 1976) sur les sols forestiers vosgiens de l'étage montagnard, où la teneur en argiles et en fer amorphe lié contrôle étroitement le degré d'humification de la matière organique.

(2) Une décarbonatation préalable augmenterait notablement le taux d'extraction en milieu carbonaté.

(3) Il faut néanmoins noter l'opposition mise en évidence par LABROUE et TOSCA (1977) entre les graminées de mode thermique (C/N 40 à 70) et les saules nains des combes à neige (C/N 30).

(4) Le processus de décarbonatation libère du fer sous forme "amorphe" (brunification) : ceci se traduit par la corrélation négative ( $r = -0,55$ ) existant entre le calcium échangeable et la teneur en fer amorphe (fig. 8).

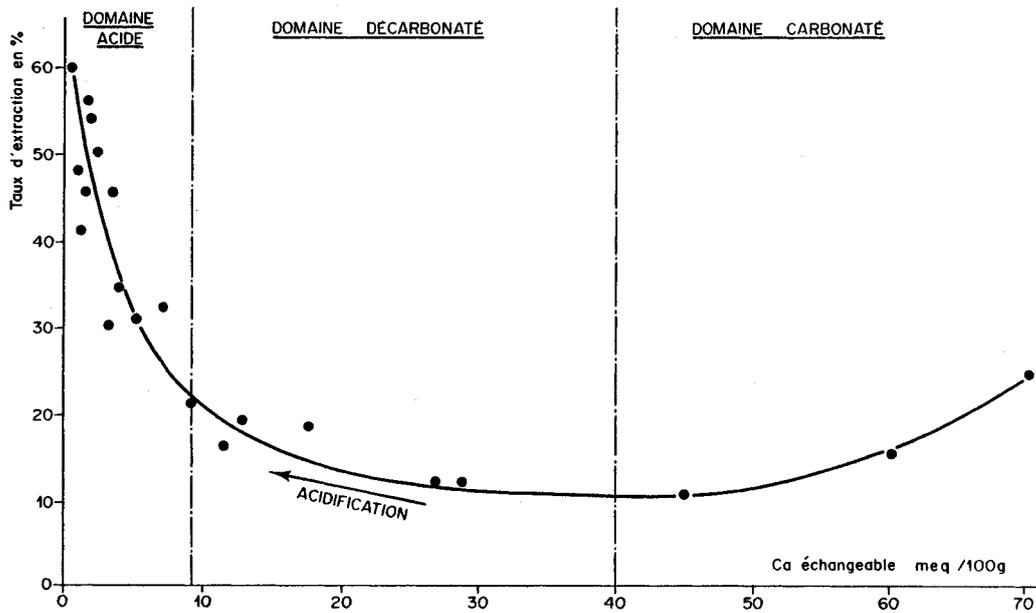


Fig. 5.- Taux d'extraction au pyrophosphate de sodium 1% du carbone de la fraction humifiée ( $d > 1,8$ ) en fonction de la teneur en calcium échangeable.

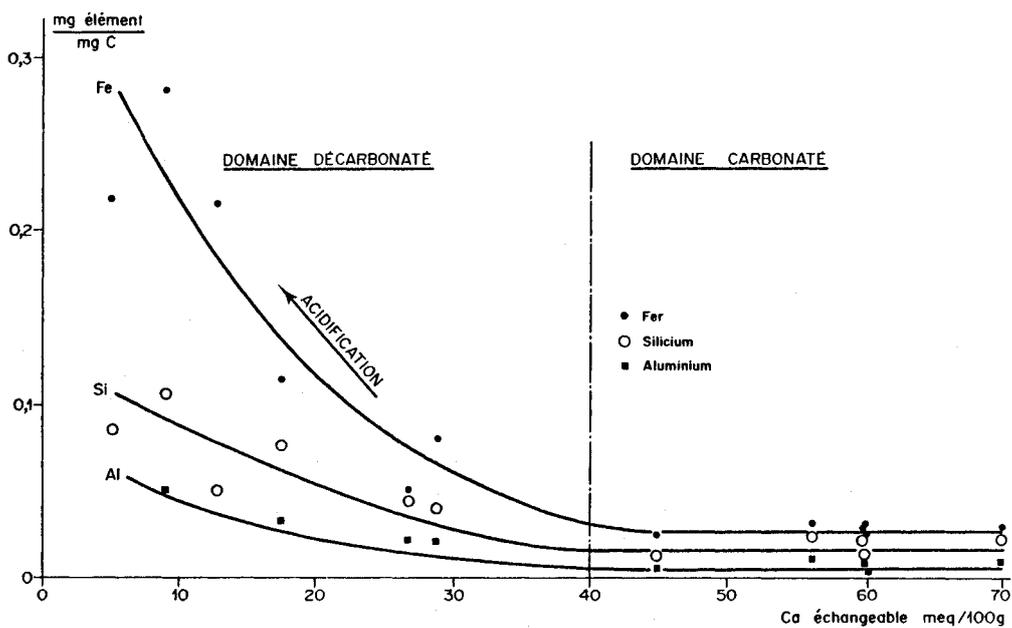


Fig. 6.- Éléments minéraux extraits au pyrophosphate de sodium 1% sur la fraction humifiée ( $d > 1,8$ ) en fonction de la teneur en calcium échangeable (humus sur roches calcaires) - le rapport mg élément/mgC représente, pour chaque élément minéral extrait, la proportion de celui-ci vis-à-vis du carbone extrait.

Sur le plan fondamental, le fer amorphe, extrait au réactif de Tamm, correspondant aux formes complexées et amorphes du fer adsorbé sur les argiles (le coefficient de corrélation argiles-fer amorphe est de 0,78) (fig. 8) serait " responsable de l'ouverture catalytique d'une partie des cycles des adsorbats organiques provoquant leur fragilisation et l'accélération de leur biodégradation " (ANDREUX, 1978), d'où un abaissement du rapport C/N de la matière organique.

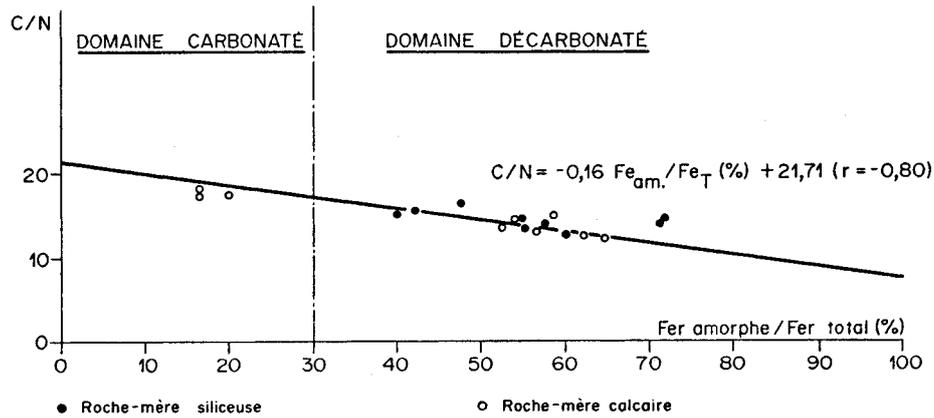


Fig.7.- Relation C/N - taux d'amorphisation du fer (fer amorphe extrait au réactif de Tamm/fer total).

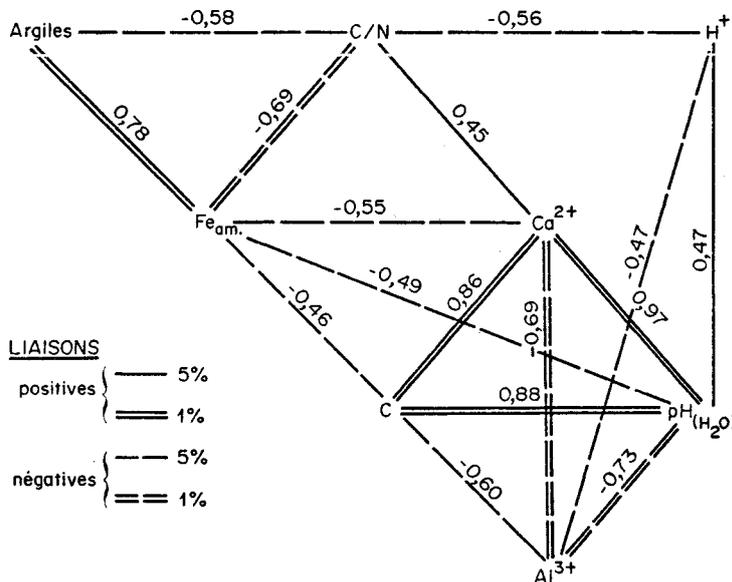


Fig.8.- Liaison entre les principaux caractères minéralogiques (argiles, fer amorphe), biochimiques (C, C/N) et physico-chimiques complexe absorbant: Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup> échangeables; pH (H<sub>2</sub>O) des 17 humus alpins étudiés. Seules les liaisons présentant un coefficient de corrélation significatif - test de Student sont matérialisées.

## CONCLUSION

Nous avons essayé de modéliser nos résultats par l'étude des corrélations plus ou moins significatives (5) pouvant exister entre les caractéristiques analytiques étudiées des humus alpins (versants sud) (fig. 8).

Les résultats statistiques de la figure 8, joints aux observations de terrain et aux connaissances physico-chimiques, thermodynamiques et biochimiques concernant l'altération des argiles et l'humification de précurseurs préhumiques, permettent d'imaginer le schéma de la figure 9, résumant de manière dynamique la pédogénèse en milieu alpin.

Ainsi, la pelouse alpine climacique, matériel potentiellement facilement biodégradable, n'est pas l'unique facteur de contrôle de l'humification en milieu alpin. La roche-mère peut, selon sa composition, freiner (rôle de Ca<sup>2+</sup>) ou catalyser (rôle des argiles et du fer amorphe associé) la biodégradation de la matière organique.

(5) Les corrélations les plus significatives (au risque de 1 %) ont déjà été mentionnées précédemment.

Les sols hydromorphes de combes à neige présentent souvent les humus les mieux structurés, allant jusqu'au type hydromull : l'enrichissement en argiles et en fer amorphe, et le lessivage du calcium accélèrent la biodégradation des débris végétaux, par ailleurs souvent les plus labiles (LABROUE et TOSCA, 1977).

Enfin, l'altération ménagée et l'humification assez bonne (ces deux processus n'étant pas indépendants) favorisent la brunification climacique de l'étape alpin (versant sud) uniquement inhibée sur roche calcaire dure (climax stationnel).

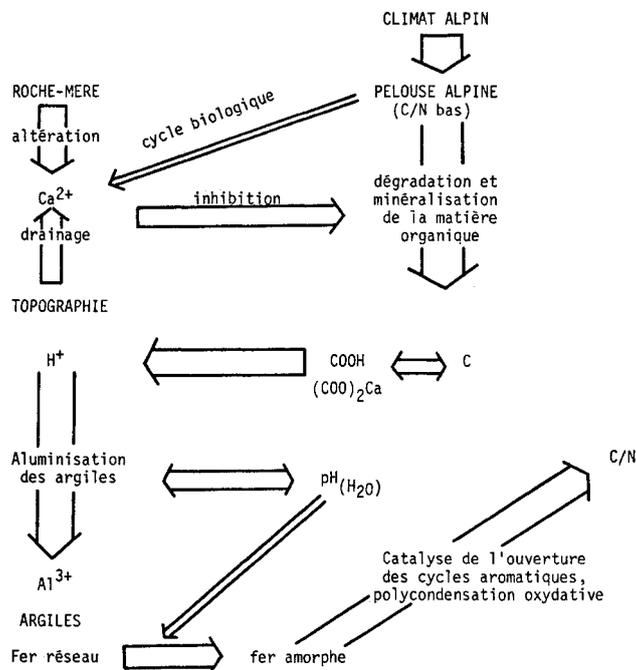


Fig. 9.- Essai de modélisation de l'humification et de l'altération en milieu alpin (versant sud).

#### Remerciements

Les auteurs remercient vivement M. Jean-Pierre DALMAS, Conseiller scientifique du Parc National des Ecrins, pour les avoir guidé sur le terrain, M. Bernard SOUCHIER, Directeur du Centre de Pédologie biologique, pour avoir favorisé les investigations analytiques nécessaires à cette étude. Ils remercient également Mmes Pierrette JEANSON (analyses totales), Renée PHILIPPY (dosage de l'azote) et M. Michel DOIRISSE (bases échangeables) pour leur aide technique, M. James ROULLER (chimie) et M. Francis ANDREUX (biochimie) pour leurs conseils analytiques.

#### BIBLIOGRAPHIE

- Academia Republicii Socialiste Romania, 1969.- Conferinta Nationala de Pedologie, Ghidul excursiilor, 164 p.
- ANDREUX (F.), 1978.- Etude des étapes initiales de la stabilisation physico-chimique et biologique d'acides humiques modèles. Thèse Doct. Etat, Univ. Nancy I, 174 p.
- AUBERT (G.), BOREL (L.), LAVAGNE (A.) et MOUTTE (P.), 1965.- Feuille d'Embrun Est (XXXV-38). Doc. Carte Vég. Alpes, Grenoble, III, 61-86.
- BELLIÈRE (J.), 1958.- Contribution à l'étude pétrogénétique des schistes cristallins du massif des Aiguilles Rouges (Haute-Savoie). Thèse Agrég. Univ. Liège.
- BLUME (H.P.) et SCHWERTMANN (U.), 1969.- Genetic evaluation of profile distribution of Al, Fe and Mn oxides. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*; 33 (3), 438-444.
- BRAUN-BLANQUET (J.) et JENNY (H.), 1926.- Vegetationsentwicklung und Bodenbildung in der alpinen Stufe der Zentral-

- alpen (Klimax-gebiet des *Caricion curvulae*). Schweiz. Naturforsch. Gesell., LXIII (2), 198-349.
- CABIDOCHÉ (Y.M.), 1976.- *Relation entre la matière organique des sols et le milieu de haute montagne dans le Parc National des Pyrénées*. D.E.A. Univ. Montpellier.
- CHAMLEY (H.), 1971.- *Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée*. Mém. Sciences Géologiques, Univ. Strasbourg, n°35, 209 p.
- CHIRITA (C.), 1974.- *Ecopédologie ou base de pédologie générale*. Ceres ed., Bucarest, 296-330.
- CHOULIARAS (N.), VEDY (J.C.) et PORTAL (J.M.), 1975.- *Fractionnement et caractérisation de la matière organique dans les rendzines*. Bull. E.N.S.A.I.A. XVII (1), 65-74.
- DALMAS (J.P.), 1972.- *Etudes phytosociologiques et écologiques de l'étage alpin des Alpes sud-occidentales françaises, et plus particulièrement de la région de Vars-Escreins (Hautes-Alpes)*. Thèse Doc. Spéc. Univ. Marseille, 173p.
- DUCHAUFOR (Ph.) et GILOT (J.C.), 1966.- *Etude d'une chaîne de sols de l'étage alpin (col du Galibier) et ses relations avec la végétation*. Oecol. Plant. 3 (1), 253-274.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1970.- *Précis de Pédologie*. Masson, Paris éd., 481 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1976.- *Dynamics of organic matter in soils of temperate regions : its action on pedogenesis*. Geoderma, 15, 31-40.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1976.- *Atlas écologique des sols du monde*, Masson Paris, éd., 178 p.
- DUCHAUFOR (Ph.), GUILLET (B.) et SOUCHIER (B.), 1979.- *Les oxyhydroxydes amorphes et cristallins dans les sols*. In : DUCHAUFOR (Ph.) et SOUCHIER (B.), *Précis de Pédologie*, Tome II, Constituants et propriétés. Masson Paris éd. A paraître.
- FAVARGER (C.), 1974.- In : PACCAUD (O.). *Le milieu alpin*. Delachaux et Niestlé éd.
- GENSAC (P.), 1977.- *Sols et séries de végétation dans les Alpes Nord-occidentales*. Doc. Cart. Ecol. Grenoble, XIX, 21-44.
- GRIFFITH (S.M.) et SCHNITZER (M.), 1976.- *Isolation and characterization of metal-organic complexes from tropical volcanic soils*. Environ. Biogeochem. Vol. 1, NRIAGU (J.O.) éd., Ann Arbor. Sci., Publ., 117-130.
- GUILLEMIN (M.), ROUILLER (J.) et BRUCKERT (S.), 1978.- *Relations entre groupes écologiques et propriétés physico-chimiques des sols brunifiés des Vosges cristallines*. Ann. Sci. Forest., 35 (2).
- HERBILLON (A.J.), 1974.- *Modifications des propriétés des charges provoquées par l'altération chimique. Rôle du processus de désilicification*. Pédologie Gand, XXIV (2), 100-118.
- LABROUE (L.), 1971.- *Evolution des sols calcaires dans l'étage alpin du Pic du Midi de Bigorre et ses relations avec le phytoclimax*. 96<sup>ème</sup> Cong. Nat. Soc. Sav. Toulouse. Sciences, IV, 433-44.
- LABROUE (L.), 1971.- *L'importance de l'albumine libre dans les sols neutres du Pic du Midi de Bigorre. Relation avec le phénomène de podzolisation*. C.R. Acad. Sc. Paris, 273, 615-618.
- LABROUE (L.), 1976.- *Etude écologique des sols alpins du Pic du Midi de Bigorre*. Thèse Doc. Etat, Univ. Toulouse. 230 p.
- LABROUE (L.) et TOSCA (C.), 1977.- *Dynamique de la matière organique dans les sols alpins*. Bull. Ecol., 8 (3), 289-298.
- LE FORT (P.), 1973.- *Géologie du Haut-Dauphiné cristallin*. Mém. Sciences de la Terre, n°25, Ann. Ecole Nat. Sup. Géologie, Nancy.
- MEKARU (T.) et UEHARA (G.), 1972.- *Anion adsorption in ferruginous tropical soils*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, 296-300.
- PALLMANN (H.), 1947.- *Pédologie et Phytosociologie*. Cong. Intern. Pédol. Médit. A.F.E.S., 1-36.
- PEDRO (G.), 1979.- In : DUCHAUFOR (Ph.) et SOUCHIER (B.), *Précis de Pédologie*. Tome II, Constituants et propriétés. Masson Paris éd. A paraître.
- ROUILLER (J.), GUILLET (B.) et BRUCKERT (S.), 1979.- *Effet des protons sur les formes de l'aluminium. Etude de deux stations sur grès vosgien*. A paraître.
- SOUCHIER (B.), 1971.- *Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges)*. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy I.
- VERGER (J.P.), 1974.- *Sol et végétation de l'étage alpin sur schistes lustrés et roches vertes en Queyras (Hautes-Alpes)*. Thèse Spéc. Univ. Grenoble. 131 p.
- VITEL (G.), 1965.- *Etude pétrographique du tunnel du Mont-Blanc (partie française) et recherches géologiques complémentaires dans le massif du Mont-Blanc. Aiguilles Rouges*. Thèse de Spéc. Univ. Grenoble.
- VON RAUMER (J.), 1971.- *Das Mont-Blanc Massiv. Altkristallin im Bereich Schwaichen alpiner Metamorphose*. Schweiz. Min. Petrol. Mitteil. 51 (1), 193-225.

## ANNEXE : FICHES ANALYTIQUES DES SOLS ALPINS TYPES

### I.- RANKER ALPIN MOYENNEMENT HUMIFERE

Localisation : haut de pente exposée 40° vers le sud-ouest ; 2 500 m d'altitude  
séquence de Pétarel, Valgaudemar, Massif du Pelvoux)

Roche-mère : granite porphyroïde de Pétarel

Végétation : *Festucetum halleri*

Prof. cm	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El. échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
2-9	A <sub>1</sub>	brun rouge 2,5 YR 3/2	13,3	5,3	0,388	13,7	4,4	3,9	1,40	2,10	3,65	1,40	6,15	34,1	4,3	2,5	0,3

### II.- SOL BRUN ACIDE PEU HUMIFERE

Localisation : replat sur une crête, exposition 5° vers le sud-est ; 2 420 m d'altitude  
séquence des Grandes Autannes (Massif du Mont Blanc)

Roche-mère : gneiss ocellaire

Végétation : *Caricetum curvulae*

Prof. cm	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El. échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
2-12	A <sub>1</sub>	beige rose 2,5 YR 6/2	16,9	2,6	0,155	16,8	4,5	3,5	1,90	2,32	8,24	0,72	11,28	20,0	5,7	2,9	0,3
12-20	A <sub>1</sub> (B)	brun beige 5 YR 5/4	3,1	1,3			4,6	4,1	1,10	1,37	3,70	0,23	5,31	25,8	5,4	2,2	0,2
20-40	(B)/C	beige jaune 10 YR 7/5	3,2	0,7			4,8	4,7	0,60	0,74	1,29	0,03	2,10	35,2	2,4	1,5	0,2

### III.- SOL BRUN CALCIQUE MOYENNEMENT HUMIFERE

Localisation : mi-pente exposée 30° vers le sud-ouest, 2 460 m d'altitude  
séquence de Vallompierre (Valgaudemar, Massif du Pelvoux)

Roche-mère : Calcschiste liasique

Végétation : *Festucetum violaceae*

Prof. cm	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El. échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
0-4	A <sub>1</sub>	Beige 5 YR 6/2	14,9	4,3	0,353	12,2	5,0	4,5	4,10	5,47	0,43	2,59	8,51	64,3	9,0	1,5	0,2
4-8	(B)	Brun 7,5 YR 5/2	11,3	0,8			5,0	4,8	1,30	1,67	0,00	1,30	2,97	56,2	7,3	0,1	0,1
8-38	(B)/C	brun gris clair 7,5 YR 5/1	10,5	0,45			6,8		6,10	6,68	0,00	0,00	6,68	100,0	2,7	0,3	0,1

### IV.- STAGNOLEY INITIAL

Localisation : bas de pente, orientée 10° vers le sud-ouest, au bord du Lac de Pétarel ; 2 290 m d'altitude  
séquence de Pétarel (Valgaudemar, Massif du Pelvoux)

Roche-mère : granite porphyroïde de Pétarel

Végétation : *Ranunculeto Alopecuretum gerardi*

Prof. cm	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El. échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
2-24	A <sub>1</sub>	Brun noir foncé 7,5 YR 2/2	12,6	7,5	0,515	14,6	5,0	4,4	0,90	1,42	4,06	0,00	5,48	25,5	7,7	6,9	0,7
24-39	A <sub>1</sub> (B)	Beige rouge 5 YR 6/4	10,1	1,7			4,6	4,3	0,50	0,62	2,61	0,10	3,23	18,8	4,7	4,2	0,4

## V.- STAGNOGLEY CALCIQUE

Localisation : replat de bas de pente orientée sud-ouest ; 2 390 m d'altitude  
séquence de Vallonpierre (Valgaudemar, Massif du Pelvoux)

Roche-mère : Calcschiste liasique

Végétation : *Salicetum herbaceae*

Prof. (cm)	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El.échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
2-6	A <sub>1</sub>	Brun gris clair 5 YR 4/1	24,3	8,0	0,618	12,9	5,0	4,6	12,90	14,59	2,35	3,70	20,61	70,8	11,1	1,7	0,3
6-28	A <sub>1</sub> (B)	Beige clair 10 YR 8/2	31,0	2,0			4,5	4,0	2,20	2,49	3,60	2,03	8,12	30,7	14,2	2,4	0,2
28-41	B <sub>t</sub>	Beige clair 7,5 YR 8/2	29,9	1,1			4,7	4,1	1,80	1,96	2,92	0,82	5,70	34,4	12,5	2,3	0,1
41-53	(B)/C	Beige gris 2,5 Y 5/2	22,9	0,6			4,6	4,2	2,00	2,19	2,35	0,20	4,74	46,2	8,0	1,4	0,2

## VI.- SOL HUMO-CALCAIRE

Localisation : mi-pente orientée 50° vers le sud-est ; 2 180 m d'altitude  
séquence de Balme (Col de Balme, Massif du Mont Blanc)

Roche-mère : calcaire massif (lias)

Végétation : *Seslerio semperviretum*

Prof. cm	Hor.	Couleur (sec)	Argiles %	C %	N %	C/N	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	El.échang. au pH du sol m.e./100g					100 $\frac{S}{CEC}$	Amorphes %		
									Ca <sup>2+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	CEC		Fe	Al	Si
0-26	A <sub>1</sub>	Brun foncé 7,5 YR 3/2	10,5	5,7	0,893	17,6	7,5		60,00	60,69	0,00	0,00	60,69	100,0	2,4	0,2	0,3
26-36	A <sub>1</sub> (B)	Brun 7,5 YR 5/2	14,9	2,1			8,3		44,00	44,33	0,00	0,00	44,33	100,0	1,6	0,1	0,2