

# Méthodes

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidg. Tech. Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich**

Band (Jahr): **117 (1994)**

PDF erstellt am: **05.08.2024**

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

3 METHODES

3.1 Méthodes d'analyses pédochimiques

3.1.1 Récolte, préparation, conservation des échantillons de sol

Les échantillons ont été prélevés vers la fin de la saison entre mi-septembre et octobre. Si le début de la saison, à la fonte des neiges, semble correspondre à un moment où les réserves nutritives du sol atteignent plutôt un maximum (minéralisation et altération hivernale; pH ± maximal), la fin de saison correspond plutôt à un minimum (épuisement par la végétation; lixiviation surtout dans les sols bruts; pH ± minimal). La choix des sols à analyser a été fait avant l'élaboration des relevés de végétation beaucoup plus nombreux, et visait à retenir les sols les plus divers sur serpentine. Valeurs brutes annexe 2 et 3.

Les prélèvements de sol comprennent un minimum de 4 prises sur moins d'un m<sup>2</sup>, mélangées, c.-à-d. bien en dessous des quelques 20 prises sur moins d'un ha préconisées en agriculture : le terrain étudié est partout très inhomogène et j'ai préféré avoir une image des sols ponctuelle plutôt que moyenne. Les échantillons destinés à être analysés frais ont été gardés à + 3°C, les autres ont été immédiatement séchés à l'air, tamisés à 2 mm et conservés jusqu'à l'analyse à température ambiante 18-20°C, dans des bocaux non hermétiques protégés de la poussière. Selon l'élément analysé les échantillons ont dû être analysés en plus d'une série. J'ai effectué 2 analyses parallèles par échantillon. Les erreurs par rapport à la moyenne de ces 2 répétitions comportent en moyenne ±2 à ±5 %, jusqu'à 10 % pour des valeurs faibles. Sauf indication, les valeurs se rapportent à la terre séchée à l'air ("sec"), c.-à-d. contenant entre .6 à 2.7 % H<sub>2</sub>O.

élément	état du sol	tami-sé [mm]	broyé	mesuré en n séries	conser-vation avant analyse	répé-titions	erreurs de mesure (vs moy.)	prise [g]	sol: solution de l'ex-traction	pH	extractants, dispersant, etc.
pH	frais	2		p. 40	p. 40	1	±.2(.5)upH	20	1:2.5		H2O/CaCl2 .01M
C	sec	2	+	2	3-5m	2	±2.5%	1	1:40-65		H2SO4 c.; K2Cr207 2N
C gran	sec	2		2	1-5a	1	±1. %	10-50	variable		H2O2 30%
P assim	sec	2	+	1	3; 17m	1-3	±5. %	3.5	1:10	8.5	NaHCO3 .5M
P tot	sec	2		1	10a	2		.5	1:10		70% HClO4
ML tot	sec	2		1	3a	1		10.	1:5(25)		HCl + HNO3
S tot	sec	2	+	1	3a	1	±1. %.	.02-1.			coulométrie
T=CEC	sec	2		1	3a	2	±3.5%	2.5	1:12	7.0	CaCl2 1N; NH4OAc 1N
S cat	sec	2		1	7m	2	±3.5%	2.5	1:12	7.0	NH4OAc 1N
N tot	sec	2	+	1	3; 5a	2	±2. %	1.	1:10(20)		H2SO4 c.
NH4+	frais	4		p. 51	3j/6s	1		5	1:8		KAl 1%
NO3-	frais	4		p. 51	3j/6s	1		20	1:2.5		KAl 1%
sédim.	sec	2		1	1-5a	1		10	1:10		Na2P207 1%
tamis.	sec	2		1	"	1		50	1:10		"
element	soil: dry or fresh	sif-tered [mm]	grou-nd	measu-red in n series	conser-vation before analys.	repe-titions	errors of measure (vs average)	sample [g]	soil: solution of ex-traction	pH	extractants, dispersant, etc.

j = jour = day; s = semaine = week; m = mois = month; a = année = year.  
sédim. = sédimentation; tamis. = tamisage

Fig. 19

Conditions d'analyse des échantillons de sols, légende annexe 1.  
Conditions of soil samples subjected to analysis, legend annex 1.

### 3.1.2 pH

Le pH a été déterminé potentiométriquement avec une électrode en verre, dans une solution soit d'eau distillée (pHA), soit de CaCl<sub>2</sub> .01M (pHC), la mixture secouée vigoureusement, laissée reposer 24h et mesurée en remuant l'électrode, à partir d'échantillons frais (pHf) et secs (pHs). STICHER e.a. 1971:75; fig. 19. Les pH employés dans le texte sont des pH de terre sèche, sauf mention spéciale.

Le ph est une mesure courante présente dans quasi tous les travaux traitant de la serpentine, le plus souvent cependant sans précision ni de méthode ni de contexte. Or la valeur du ph varie substantiellement selon les conditions de mesure. Aussi la discussion plus détaillée qui va suivre est-elle destinée à mieux comparer les résultats obtenus par les diverses méthodes et dans les diverses conditions, ainsi qu'à mieux situer leur signification.

Dans les analyses des correspondances (p. 73) pH corrèle assez avec C, T et Mg/Ca, ce qui peut contribuer à justifier la valeur écologique assignée au pH (voir travaux de VAN LIEROP e.a. 1977 et BANNISTER 1976:124). Quant à la corrélation inverse entre pH et H<sup>+</sup> (=T-S), elle ne ressort pas particulièrement de ces analyses, alors que portés en fonction l'un de l'autre, leur lien n'est pas trop mauvais, fig. 37 p. 80.

Le comportement écologique du pH n'étant ici guère logarithmique et les pH ne différant que peu entre eux, je me suis permise de calculer des moyennes en traitant les pH comme des valeurs non logarithmiques (la moyenne d'une série de valeurs logarithmique vaudrait pratiquement la valeur supérieure de cette série).

#### Variations des mesures du pH

En résumé (d'après VAN LIEROP e.a. 1977:56 principalement) les mesures du pH des sols peuvent varier selon :

- 1 L'époque de prise des échantillons : en principe le pH est maximal à la fonte des neiges, minimal en fin d'été; l'oscillation annuelle du pHA comporte jusqu'à plus de 1 upH, à la suite de la dilution par la pluie, de la nitrification, etc.; fig. 20; RUNGE 1974:224; DUCHAUFOR 1960:85.
- 2 L'état du sol frais ou sec : le séchage entraîne une acidification surtout du pHA : fig. 20; VAN LIEROP e.a. 1977:58,59; SCHEFFER e.a. 1976:114; LAURA e.a. 1975:463sq.
- 3 La durée de la conservation : la conservation entraîne soit une basification, fig. 20, surtout s'il s'agit de sols riches en matière minérale semble-t-il; soit une acidification, d'autant plus importante que la teneur en matière organique est grande, LAURA 1975:463sq.
- 4 La nature des électrodes.
- 5 Le rapport sol:solution : le pH est plus acide s'il y a moins de solution, à moins qu'on ne remue l'électrode pendant la mesure; KAWAMURA 1976:360; RUNGE 1974:221.
- 6 La nature de l'électrolyte ou sel additionné : les pHC sont plus acides que les pHA correspondants.
- 7 La concentration en sel de la solution : le pH est d'autant plus acide que la concentration est élevée.
- 8 La nature du cation dominant dans le complexe d'échange et la pression partielle du CO<sub>2</sub> : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> joue un rôle tampon important dans les sols à pH supérieurs à 6.8 et probablement prioritaire si les sols sont pauvres en matière organique comme mes sols serpentiniques; Al<sup>3+</sup> dans les sols à pH entre 4 et 5; H<sup>+</sup> à pH inférieur à 4 (ROUILLIER e.a. 1980:173; 1983 comm. écrite).
- 9 Le domaine même du pH.

Variations dues à la saison de récolte, le séchage, la conservation

Saison. Sur serpentine à Davos, les données ponctuelles, fig. 20, suggèrent un pH plus ou moins constant de juillet à août, devenant plus basique en gros de .5 upH d'août à septembre, sans que je dispose du pH à la fonte des neiges (il permettrait de se faire une idée de l'oscillation annuelle, qui à son tour, sur les sols peu développés, pourrait donner une idée du tamponnage des sols).

Séchage. Les mêmes sols accusent après séchage une acidification d'un ordre de grandeur inférieur aux fluctuations saisonnières, fig. 20. VAN LIEROP (e.a. 1977:58,59) constatent également une acidification à la suite du séchage à 110°C de leurs divers types de sols cultivés : ce sont les pH des sols frais mesurés dans KCl 1M qui offrent les meilleures corrélations avec les diverses propriétés d'échange; suivis des pHA des sols secs (idem sur serpentine, voir ci-dessus); sans que les corrélations entre sols secs et pH dans d'autres solutions ne soient mauvaises. SCHLICHTING (e.a. 1966:82) note que la CEC tend à être plus élevée dans les sols secs que dans les humides. (Par ailleurs la CEC des sols basiques est généralement supérieure à celle des sols acides.)

variable	inter- valle	série no	nb d' éch. sols	pH moy de départ	$\overline{\Delta pH}$ ( $\pm Sx$ ) moyenne des	différence assurée à (100-prob)	tendance à changer
1 saison							
$\Delta pHA_f:15.7 \rightarrow 19.8$	36j	1	30	6.4	+0.03( $\pm .23$ )	48. %	constant
$\Delta pHA_f:12.8 \rightarrow 23.9$	41j	2	7	6.3	+0.46( $\pm .29$ )	**99.4%	basific.
variation annuelle DUCHAUFOR 60:85	12m				.5 à 2.		
2 séchage							
$\Delta pHA:frais \rightarrow sec$	14m	1	30	6.4	-0.25( $\pm .26$ )	***100. %	acidific.
$\Delta pHA:f \rightarrow s+conserv!$	39m	2	7	6.3	+0.13( $\pm .27$ )	75. %	(basif.!!)
$\Delta pHA$ :f→s			10	5.0	-0.51( $\pm .20$ )		acidifi- cation
$\Delta pH CaCl_2 .015M:f \rightarrow s$	1j		10	4.1	-0.21( $\pm .14$ )		
$\Delta pH KCl 1N$ :f→s VAN LIEROP ea.77:58	110°C		10	3.8	-0.28( $\pm .19$ )		
3 conservation							
$\Delta pH_Cs:conservation$	36m	3	40	6.4	+0.16( $\pm .38$ )	*99. %	basific.
$\Delta pH_Cs:conservation$	34m	2	7	6.0	+0.47( $\pm .28$ )	**100. %	basific.
variable	inter- val	ser- ies no	no of soil samp.	mean pH at begin.	mean change	significant difference	tendency to change

$\Delta$  différence                      f frais fresh                      j jour day                      \* 5-1 %  
A acqua dest.                      s sec dry                      m mois month                      \*\* 1-.1 %  
C  $CaCl_2 .01M$  etc.                      Sx écart type =                      standard deviation                      \*\*\* .1-0 %

Fig. 20

Variation des mesures de pH de Davos dues à la saison de récolte, au séchage, à la conservation des sols et comparaison avec d'autres travaux.

Variation of pH measurements from Davos due to yield season, drying and conservation of the soils and in comparison with other works.

Conservation. Elle s'accompagne, dans les exemples empruntés à la serpentine, d'une basification du même ordre que les modifications précédentes. La basification enregistrée au deuxième exemple rangé sous "séchage" fig. 20 est sans doute due à l'effet plus important de la conservation que du séchage lui-même, vu les 39 mois qui séparent prises fraîches et mesures sèches. Voir en outre point 3 p. 39.

Variations dues au milieu de mesure

Le pH dans l'eau distillée étant sujet à beaucoup de variations, on a pris l'habitude de mesurer le pH dans une solution soit de CaCl<sub>2</sub> 1M, soit de KCl .1N ou 1.N, qui compriment les effets des fluctuations saisonnières, du séchage, du rapport sol:solution et des potentiels de jonction ou de diffusion etc. (VAN LIEROP e.a. 1977:56,58; RUNGE 1974:224; SCHLICHTING e.a. 1966:93,94). Par contre ces sels solubilisent des H<sup>+</sup> et une part de cations échangeables, Al<sup>3+</sup> etc. : aussi les valeurs de pH<sub>C</sub> sont-elles inférieures à celles de pH<sub>A</sub> et plus arbitraires, mais elles ont fait leur preuves pratiquement. Les pH CaCl<sub>2</sub> .01M et KCl .1N sont largement semblables. VAN LIEROP e.a. 1977:58,59 trouvent les meilleures corrélations avec les diverses propriétés d'échange pour le pH mesuré dans KCl 1M. (Discuté également chez SCHLICHTING : o.c.).

$-\Delta\text{pH}$ ↗	pHC CaCl <sub>2</sub> .01 M	pHC CaCl <sub>2</sub> .1 M	pHC CaCl <sub>2</sub> 1. M	pHC KCl .1 N	pHC KCl 1. N	domaine du pH <sub>A</sub> ± Sx	sols	nb éch. sols	auteur
pH <sub>A</sub> H <sub>2</sub> O	.68±.15			.93±.12		4.76±.26	silicates	8	GIGON 1971:74
	.39±.17					5.19±.54	silicates	26	DICKENMANN 1982:56
	.42±.11					6.35±.31	serp 5.5 à 6.75	47	
	.34±.13					7.06±.20	serp 6.75 à 7.5	54	
				.39±.07		7.19±.31	ophic 6.6 à 7.9	46	
						7.47±.16	carbonates	8	GIGON 1971:74
	.60						loess	n.i.	SCHEFFERea 76:114,5
	.55	.92			.70		org. cultivés	20	V.LIEROPea 77:62
			1.08±.08		.94±.08		luzulo-fagetum	5	RUNGE 1974:225
						pHArange	soils	no	author

Fig. 21

Changements des valeurs de pH suivant la solution où ils sont mesurés.

*Changes in the pH values according to the solution in which they were measured.*

Dans les sols de Davos, l'écart entre pH<sub>A</sub> et pH<sub>C</sub> paraît augmenter avec l'acidité, fig. 21, 22. Or dans les analyses factorielles des correspondances entre variables du sol, ΔpH sur serpentine s'avère ne corrélérer avec rien. Par contre selon ROUILLIER (e.a. 1979 ex BARTOLI e.a. 1979:82) les différences entre pH<sub>A</sub> et pH<sub>C</sub> donnent une idée du pouvoir tampon du sol et permettent de caractériser les propriétés de surface des particules organo-minérales du sol : un ΔpH approchant 0 correspond à une tendance à favoriser la floculation, un ΔpH négatif la dispersion et la migration. Cependant dans le domaine du pH où les sols sont saturés, soit pH de 6.0 à 7.5, l'intérêt du ΔpH est moindre, surtout si les sols sont pauvres en matière organique : en effet, au voisinage de la neutralité le sol n'a pas de pouvoir tampon aluminique, et au-dessus de pH 6.8 c'est HCO<sub>3</sub> qui affecte un rôle tampon important, c.-à-d. que le sol n'a plus de pouvoir tampon dépendant de ses propres qualités. (ROUILLIER comm. écrite 1983; DUCHAUFOUR e.a. 1979:359sq).

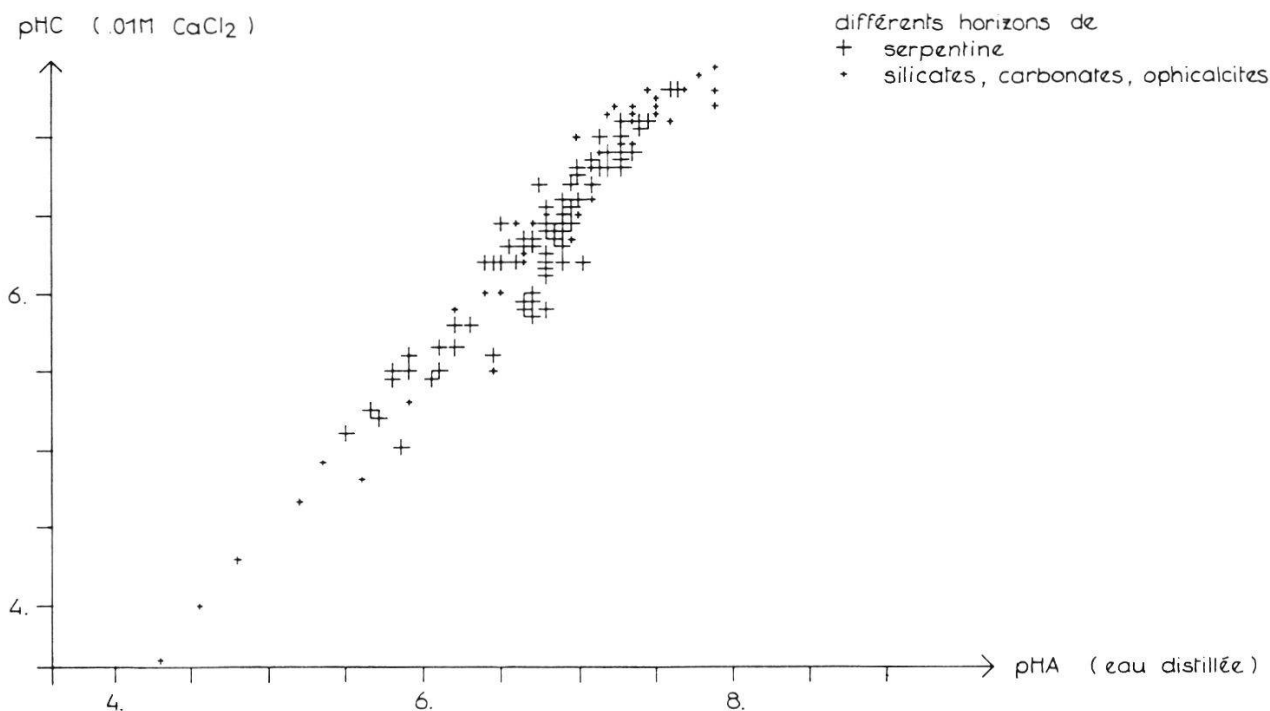


Fig. 22  
pHA et pHc des sols de Davos.  
*pH aqua dest. and pH .01M CaCl2 of soils from Davos.*

### 3.1.3 Macronutrients : C et P

C organique total : méthode Riehm-Ulrich.  
Oxydation liquide au H2SO4 concentré, puis au K2Cr2O7 2N en étuve à 120°C.  
Mesure photométrique à 578 nm du Cr3+ formé, étalonnage au Na2C2O4. SCHLICHTING  
e.a. 1966:121; fig. 19.

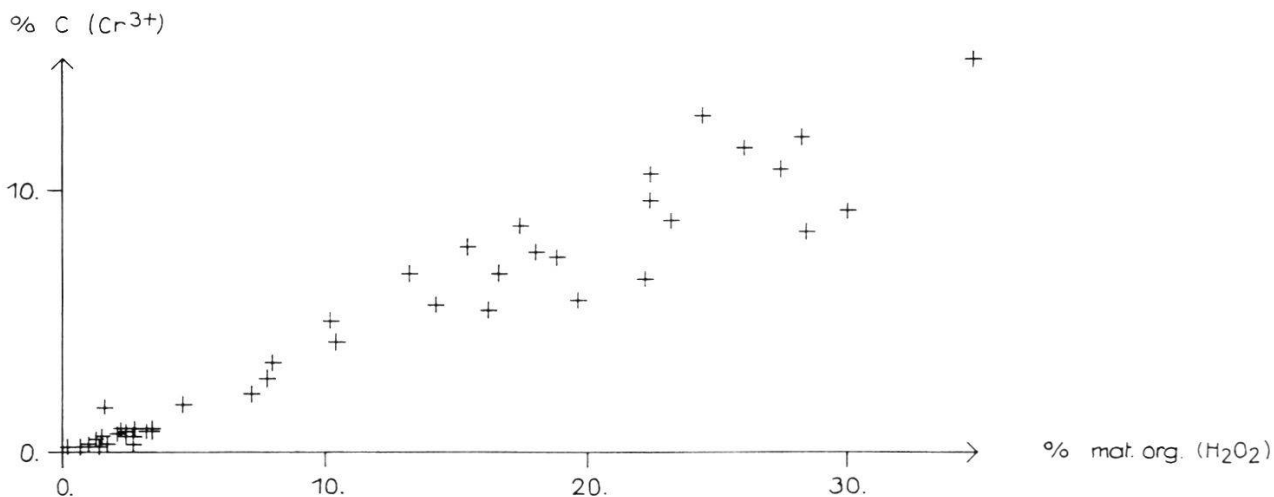


Fig. 23  
Comparaison des analyses de C : valeurs de C obtenues par calcination au H2SO4 conc. et K2Cr2O7 2N et valeurs de la substance organique perdue par calcination au H2O2 30% (45 échantillons de sols).  
*Comparison of C analysis : C content obtained by calcination with conc. H2SO4 plus 2N K2Cr2O7 and content of organic matter lost by calcination with 30% H2O2 (45 soil samples).*

Cette méthode appréhende suivant les sols environ 90 % de la substance organique, sans le carbone élémentaire, supposé négligeable sur serpentine. Selon la moyenne de 45 échantillons de sols comparés, fig. 23, les valeurs de la substance organique perdue par calcination au H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (p. 55) sont 2.1 fois supérieures aux valeurs de C obtenues par calcination au K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Si l'on admet que la substance organique, l'humus, contienne en moyenne 58 % de C (STICHER e.a. 1971:79) correspondant à un facteur 1.7, et que la calcination au K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> appréhende 90 % du C, correspondant à un facteur 1.1, on s'attend à un rapport entre les valeurs des deux méthodes de  $1.7 \times 1.1 = 1.9$ , à confronter au 2.1 trouvé. Ainsi la calcination au K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> livre des valeurs inférieures à celle au H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Selon REHDER 1976a:414 les valeurs obtenues par calcination au K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> sont moins fiables que celles obtenues par analyse gazeuse, et également le plus souvent trop basses.

\*

PO<sub>4</sub>(3-) assimilable : méthode OLSEN.

PO<sub>4</sub>(3-) extrait au NaHCO<sub>3</sub> .5M à pH 8.5, l'échantillon agité 30 min puis centrifugé à 12'000 t/min, la solution acidifiée à pH 5 au H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5N, rapidement chauffée à 90°C, éventuellement filtrée, et PO<sub>4</sub>(3-) complexé au bleu de Mo. Complexes mesurés colorimétriquement après 10 min, à 840 nm (750 nm), étalonnage au KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. OLSEN e.a. 1954, ex JACKSON 1958; fig. 19.

Aucune méthode d'analyse de PO<sub>4</sub>(3-) n'est pleinement satisfaisante, et les teneurs obtenues par divers extractants sont difficilement comparables, vraisemblablement du fait des multiples formes que PO<sub>4</sub>(3-) peut revêtir dans les sols. Les extractions courantes sont faites en milieu soit basique soit acide et se basent sur le déplacement d'équilibres existant dans les sols. Ces extractions sont donc relativement fortes puisqu'elles ont lieu indépendamment du pouvoir tampon du sol par rapport à P : aussi les valeurs indiquent-elles plutôt une limite supérieure de disponibilité momentanée (DUCHAUFOR e.a. 1979:400; ABBOTT 1978:82sq; GUPTA e.a. 1974; PIRKL e.a. 1969). PO<sub>4</sub>(3-) est le mieux disponible entre pH 6 et 7 (LARCHER 1973:136). L'extrait au NaHCO<sub>3</sub> est usuel en pays anglophones, valable pour sols calcaires ou non; l'extrait à l'oxalate de NH<sub>4</sub> .2N pour sols calcaires, à l'acide citrique à 2 % à pH 2 pour sols acides et neutres en France; l'extrait au lactate en Allemagne. Notons encore que le séchage des sols augmente la minéralisation de P (GUPTA e.a. 1974).

\*

P total : phosphate dit résiduel.

Extrait par attaque de .5 g de sol à l'aide de 5 ml de 70 % HClO<sub>4</sub>. Selon BOHNE e.a. 1958 et DUCHAUFOR e.a. 1979:397.

3.1.4 Teneurs totales, valeurs isolées : Ni, Cr, etc.

Ni Cr Cu Zn totaux.

Extrait à l'eau régale (HCl + HNO<sub>3</sub>) pendant une nuit, chauffé légèrement 2 h, filtré et dilué, dosé par absorption atomique. Analyses effectuées par le Dr HAENI en 1979, Station fédérale de recherches, Liebefeld.

\*

S Soufre total.

Echantillons de sols et de roches pulvérisés dans un moulin en agate 4 à 6 min, le soufre mesuré dans un coulomètre : à savoir titration de l'électrolyse produite par le gaz s'échappant du four chauffé à 1400°C, les échantillons déposés dans une cuvette en porcelaine par portions de 20-100 mg. Analyses effectuées chez le Pr DIETRICH en 1981, Institut de Pétrographie de l'EPF, Zurich.

### 3.1.5 Complexe absorbant : T Ca Mg K Na etc.

On caractérise l'état du complexe absorbant par :

T (CEC) capacité d'échange cationique : en fait charge globale de l'échangeur, exprimée en nb de lieux d'échange/poids de terre.

T<sub>pot</sub> potentielle (maximale) à pH 7.0 (SCHEFFER e.a. 1982:81,93sq; correspond aux charges "permanentes+variables", DUCHAUFOR e.a. 1979:342). Dans le texte T = T<sub>pot</sub>.

(T<sub>eff</sub>) effective au pH du sol, non tamponné, (charges "permanentes", non analysées ici).

S Somme des cations métalliques actuellement retenus par le complexe : pratiquement  $\Sigma$  (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>) qui dominent. Les valeurs singulières de ces éléments, le rapport entre eux autant que leur somme, conditionnent la fertilité (LEMEE 1978:106). Théoriquement mesurés au pH du sol, ici à pH 7 comme T.

H H<sup>+</sup> d'échange ou acidité d'échange : en principe H = T<sub>pot</sub> - S. L'acidité totale titrable correspond à l'acidité d'échange H<sup>+</sup> et Al<sup>3+</sup> des charges permanentes, plus les sites acides de surface des charges variables (ROUILLER e.a. 1980:172).

V taux de saturation du complexe absorbant en cations métalliques :  
 $V = S/T_{pot} * 100$ .

Malgré les liens peu rigoureux entre T S H, il est courant de ne mesurer que 2 des valeurs. La majorité de mes sols étant neutres ou modérément acides, je m'attendais à une teneur en H<sup>+</sup> peu élevée. Je me suis bornée à calculer H = T - S. H s'avère assez lié au pH (voir p. 80). Selon les analyses factorielles des correspondances (fig. 36-1 à 9, p. 75sq) V est inversement bien corrélé avec T et H, et plutôt indépendant de S.

\*

T capacité d'échange cationique.

Complexe absorbant saturé à CaCl<sub>2</sub> 1N par agitation en volume fini avec 3 renouvellements de la solution; lavé à l'alcool isopropylique; les Ca<sup>2+</sup> adsorbés extraits et dosés comme ci-dessous.

\*

S : Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> K<sup>+</sup> Na<sup>+</sup> Al<sup>3+</sup> Ni<sup>2+</sup> Cr<sup>3+</sup> échangeables.

Cations extraits à NH<sub>4</sub>OAc 1N pH7, dosés par absorption atomique. Addition aux dernières solutions de 25 ppm La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> pour éviter les perturbations des mesures de Ca et Mg par PO<sub>4</sub> (par la formation de composés de ces éléments difficilement atomisables dans la flamme du SAA); de 25 ppm CsCl pour comprimer l'ionisation de K sous l'action des sels de Mg et Na (K absorberait alors à d'autres longueurs d'onde; effet de compression possible du Cs sur Ca négligé). Toutes les mesures, indépendamment des dilutions, effectuées dans NH<sub>4</sub>OAc 1N. BLACK e.a. 1969; DUCHAUFOR e.a. 1979:444sq modifié selon les instructions du spectrophotomètre de flamme à absorption atomique PERKIN-ELMER 1974; fig. 19.

Ti Mo Fe n'ont pas été mesurables dans ces extraits. Les teneurs en Cr se situaient à la limite de sensibilité de l'appareil, ainsi que la plupart des teneurs en Al et Ni (et Na).

Sols calcaires. L'anion acétate de la solution d'extraction forme en milieu 1M et pH7 un complexe avec Ca (et avec Mg), à constante de stabilité telle que le CaCO<sub>3</sub> (et le MgCO<sub>3</sub>) est dissous d'une manière appréciable. On obtient donc pour les sols carbonatés ou à influence de carbonates, tels les sols d'ophicalcite et de serpentine à veines de calcite, des valeurs de Ca Mg T vraisemblablement surestimées (DUCHAUFOR e.a. 1979:350; SCHEFFER e.a. 1976:115).



### 3.1.6 Erreurs d'analyses pédochimiques

#### Fluctuations des résultats à l'exemple du complexe absorbant

La répétition d'une même analyse de sol révèle d'amples variations dans les résultats. Afin de m'en faire une idée, j'ai estimé les fluctuations d'une part entre les analyses parallèles des échantillons, d'autre part entre les différentes séries d'analyses. Les fluctuations entre les 2 parallèles a et b à l'intérieur d'une série d'analyse peuvent donner une idée de la dispersion due à l'inhomogénéité du matériel ainsi qu'à l'analyse mêmes. A cet effet j'ai calculé le rapport des teneurs analysées a/b ou b/a, soit  $R = \text{valeur inférieure/valeur supérieure}$ , et la différence  $E = 100(1-R)$ , fig. 24. Les échantillons présentant une différence supérieure à 25 % ont été soit écartés, soit réanalysés (sauf pour Na, sans importance écologique pour la serpentine).

élément analysé E[%]	différence moyenne E % entre parallèles a et b ± écart type Sx ( ) nb d'échantillons			erreur par rapport à la moyenne
	série A	série B	série C	
CEC=T	13. ± 11. (35)		4. ± 4. (72)	± 3.5 (107)
Ca	10. ± 7. (35)	4. ± 6. (92)	8. ± 7. (23)	± 3.1 (150)
Mg	7. ± 7. (35)	3. ± 5. (94)	3. ± 4. (23)	± 2.2 (152)
K		5. ± 7. (94)	7. ± 8. (21)	± 2.9 (115)
Na (tous,all)	16. ± 12. (33)	22. ± 16. (58)	29. ± 20. (22)	± 10.9 (113)
Na (< 25 % E)	12. ± 9. (28)	13. ± 8. (37)	12. ± 8. (11)	± 6.3 ( 76)
element analysed E[%]	mean difference E % between parallels a and b ± standard deviation Sx ( ) no of samples			error with regard to the mean

Fig. 24

Fluctuations des résultats des analyses entre parallèles a et b.  
*Fluctuations in the analyses results between parallels a and b.*

Les fluctuations entre les 3 séries d'analyses A, B, C peuvent éventuellement donner une idée des effets de la conservation sur les échantillons (en plus des variations ci-dessus), fig. 25.

Les différences entre séries sont nettement plus importantes que celles entre parallèles. Présent en grandes quantités dans la plupart des échantillons, le Mg fluctue aussi le moins entre les mesures. Par contre, proches de la limite de sensibilité de l'appareil, les teneurs en Na, frisent l'arbitraire. Problématique également le K, présent ici en faibles doses, et dont la mesure est fortement brouillée par les interférences d'autres éléments. Bref, les valeurs de ces analyses sont à prendre avec quelque réserve.

\*

6 échantillons du sol 109.1-6 ont été analysés simultanément (annexe 2; p. 104):

- 1 et 2 récoltés à 2 ans d'écart
- 2 à 6 récoltés en même temps mais traités différemment :
- 2 tamisé à << 2. mm, normalement; 6 tamisé à << 2 mm; 4 tamisé à << 1 mm
- 5 fraction 1. à 2. mm
- 3 broyé

Les différences assez grandes entre les résultats sont peu interprétables. La fraction 4, la plus fine, tend à avoir les valeurs biogènes les plus élevées.

\*

Les valeurs retenues pour ce travail proviennent pour les cations S d'une seule série estimée 7 mois après la prise des échantillons et pour T d'une autre série estimée 38 mois après la prise. Il se peut donc que les valeurs T soient surestimées par rapport aux cations S correspondants.

série d'analyse X ↓ Y interv.X→Y nb comparés	A ↓ B 23 mois (9)		B ↓ C 32 months (9)		A ↓ C 55 mois (13)		A ↘ B calculé ↙ C	
	B=m1.A m1 ± Sx	E[%]	C=m2.B m2 ± Sx	E[%]	C=m3.A m3 ± Sx	E[%]	C=m1m2.A m3'	E[%]
CEC	.97 ±.15	3.	.76 ±.06	24.	1.34 ±.24	25.	.74	26.
Ca	1.13 ±.16	11.	.85 ±.08	15.	.90 ±.12	10.	.96	4.
Mg			1.08 ±.14	2.	1.03 ±.36	3.		
K			1.13 ±.43	11.	.98 ±.46	2.	.57	43.
Na	.50 ±.14	50.						
Y=m.X+n	B=m1.A+n1 m1 n1	r <sup>2</sup>	C=m2.B+n2 m2 n2	r <sup>2</sup>	C=m3.A+n3 m3 n3	r <sup>2</sup>	C=m1m2A+m2n1+n2 m3' n3'	
CEC					1.01A+704.	.98		
Ca	1.20A-77.5	.91	.79B-109.	.99	1.03A-43.1	1.00	.95A - 170.	
Mg	1.33A-102.	.95	.75B-108.	.95	1.00A-42.1	.93	1.00A - 184.	
K			1.19B-3.81	.98				
Na	.63A-1.65	.45	.51B+4.13	.81	.39A-5.56	.13	.32A + 3.29	

écart type : Sx : standard deviation  
 différence moy. entre séries : E : mean difference between series  
 mesure de l'adaptation à une droite : exacte si r<sup>2</sup>=1.00 : r<sup>2</sup> : measure of the adaptation to a straight line : exact if r<sup>2</sup>=1.00  
 séries de mesures : X,Y,A,B,C : series of measurements  
 facteurs des rapports et régression : m,m1,m2,m3 : factors of ratios and regressions  
 intervalle : n,n1,n2,n3 : interval  
 interv. : interval

Fig. 25

Rapports (Y = m.X) et régressions linéaires (Y = m.X + n) entre teneurs de quelques échantillons d'une série d'analyse à l'autre.

Ratio (Y = m.X) and linear regression (Y = m.X + n) between the values of samples from one analysis series to another, A, B, C.

#### Effets de la conservation sur les résultats

Le séchage et la conservation d'un sol, effectués pour des raisons pratiques évidentes, (ainsi que le séchage à haute température) se répercutent le plus souvent irréversiblement sur la disponibilité ou la forme des éléments analysés (par ex. SCHLICHTING e.a. 1966:93), à savoir principalement par :

- une augmentation de la teneur en H<sup>+</sup>, d'autant plus que la teneur en matière organique est grande, c.-à-d. un abaissement du pH entraînant :
- l'accroissement de la minéralisation de la matière organique du sol ainsi que des C et N de l'humus (LAURA 1975:463sq);
- l'élévation de la solubilité de P, peut-être l'élément le plus affecté (GUPTA e.a. 1974; REHDER 1976a:414 nomme une augmentation de 300 % après séchage à 105°C);
- soit la libération, soit la rétrogradation de K (DUCHAUFOR e.a. 1979:417; REHDER o.c nomme une augmentation de 100 % après séchage à 105°C).

- l'accroissement des valeurs de capacité d'échange (SCHLICHTING e.a. 1966:82) (en contradiction apparente avec le fait que les sols basiques ont généralement des CEC supérieurs aux sols acides).

\*

Il s'avère nécessaire d'étudier les différentes fluctuations et erreurs qui accompagnent ces analyses afin d'évaluer de manière critique les limites de validité des résultats obtenus.

### 3.1.7 Source agronomique et limites des méthodes

Les méthodes courantes de la pédochimie - il ne faut pas le perdre de vue - sont empruntées à la technologie agricole, qui les a développées à l'origine pour estimer l'ampleur des réserves ou capacités nutritives des sols cultivés, ainsi que de leur besoin en engrais, par des tests simples et praticables en grandes séries. Ces caractérisations assez statiques des capacités nutritives des sols n'expliquent guère l'alimentation même des plantes qui est un phénomène dynamique et fort complexe. Pourtant ces méthodes sont souvent justifiées par le fait qu'elles simulerait telle ou telle réaction (acidifiante, complexante, etc.) des racines lors de la nutrition.

La qualité d'une méthode est ainsi validée par les corrélations les meilleures le plus souvent entre teneur obtenue dans l'analyse du sol par cette méthode et teneur du même élément assimilé par les plantes de culture, avant et après fertilisation - ou encore par les corrélations entre plusieurs éléments ou rapports estimables par d'autres chemins - selon l'hypothèse que la teneur d'un élément dans une plante augmente si la teneur disponible aux plantes dans le sol augmente (ce qui est évidemment régi de surcroît par d'autres facteurs et spécifique selon les éléments). Pratiquement c'est plutôt la fixation d'une dose normale d'engrais qui est mesurée. De là sont extrapolées les teneurs dites "disponibles" aux plantes. On ne dispose jusqu'à présent quasi d'aucun moyen plus direct d'estimer cette disponibilité. (Discussion des méthodes chez DUCHAUFOUR e.a. 1979:351sq,367,371,400; MENGEL 1979:226,227; SCHEFFER e.a. 1976:210; HUNT 1972 ex MAJOR 1973a:959).

Une certaine réserve s'impose ainsi dans l'emploi de ces méthodes pour des écosystèmes naturels et aussi extrêmes qu'alpin et serpentinique. Elles ne répondent souvent ni au matériel, ni aux questions posées.

### 3.1.8 Nutrition des plantes et liens entre diverses fractions extraites

#### Nutrition minérale des plantes

Les méthodes d'analyse des nutriments du sol visent donc théoriquement à extraire (ou à mesurer) ces nutriments dans des conditions aussi proches que possible de celles dans lesquelles les plantes les ingèrent (ou les trouvent). La forme sous laquelle les nutriments du sol sont assimilés par les plantes, de loin pas pleinement élucidée, est admise être en priorité minérale, ionique, sinon organique, chélatée (éventuellement même vivante PORRET 1977:119), et toucher en dehors de N P S surtout des cations métalliques (fig. 26). L'assimilation a en principe lieu :

- soit directement à partir de la solution du sol, forme peut-être généralement préférentielle : surtout anions;
- soit par échange au niveau des radicelles, avec H<sup>+</sup> ou HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> livré par celles-ci : surtout cations;
- si ce n'est par libération, par l'intermédiaire de H<sup>+</sup> ou d'acides organiques, de réserves encore plus fortement retenues.

éléments	-nutrients		disponibilité et forme principale			
			atmo	gaz (+H <sub>2</sub> O!)		gazeux
C O H N (S) NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup> K <sup>+</sup> (Na <sup>+</sup> )	majors	organiques		anions surtout		soluble
		macro-principaux		alc/terr		échangeab.
		secondaires				
Fe <sub>x</sub> <sup>2+</sup> Fe <sub>x</sub> <sup>3+</sup> Mn <sub>x</sub> <sup>2-</sup> Zn <sub>x</sub> <sup>2+</sup> Cu <sub>x</sub> <sup>2+</sup> Co <sub>x</sub> <sup>2+</sup> Mo <sub>x</sub> <sup>-</sup> B <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup> (Ni <sub>x</sub> V <sub>x</sub> )	minors	micro-	sol	ions	cations ML <sup>*n+</sup> métall. surtout	échangeab.
		oligo-				et complexe ±soluble
Ag <sub>x</sub> Al As <sub>x</sub> Ba Cd <sub>x</sub> Cr <sub>x</sub> Hg <sub>x</sub> Na Pb <sub>x</sub> Se Sn <sub>x</sub> Sr Ti U <sub>x</sub> etc.		=fonctionnels, catalytiques etc. nécessités en petites quantités teneurs faibles → carences teneurs élevées → toxicité				
Fe <sub>x</sub> Al Si		= non essentiels, etc. sans nécess. évidente (except.!) présents en petites quantités teneurs élevées → toxicité				
		pédogénétiquement importants		oxydes+hydroxydes		±insolub.

Selon ERNST 1982:472; BAUMEISTER e.a. 1978:27sq; DUCHAUFOR e.a. 1979:408; MENGEL 1979:206; LEMEE 1978:109,126; STRASBURGER 1978:330sq; BERGMANN 1976:24; ANDERSSON 1975:126; LARCHER 1973:134  
ML\* métaux lourds, à poids spécifique > 5 g/cm<sup>3</sup>

Fig. 26

Regroupement fonctionnel des nutriments des végétaux et leur disponibilité et forme principale dans le sol.

*Functional grouping of plant nutrients and their major availability and form in the soil.*

Le pH local auquel l'assimilation a lieu est également encore sujet à controverse. A quel point et dans quel environnement immédiat les acides organiques livrés par les racines peuvent-ils augmenter les solubilités des phosphates et carbonates et de certains métaux lourds insolubles ou peu disponibles; les substances excrétées par les racines influencer les micro-organismes, qui participent alors indirectement à la nutrition et à la conversion des minéraux du sol, etc. ? (STRASBURGER 1978:332,333; ERNST 1974b:8; LARCHER 1973:134,139,144sq). La plupart des assertions au sujet de la nutrition des plantes sont des déductions à partir de cultures hydroponiques (où les éléments sont le plus souvent livrés ioniquement) et à partir d'analyses de teneurs le plus souvent de cendres de plantes, d'études de la nutrition chez les micro-organismes, etc. Alors que l'étude directe de la nutrition reste délicate. Les méthodes reflètent fidèlement ces connaissances.

#### Disponibilité des éléments minéraux du sol

Au gradient de "disponibilité" des nutriments correspond toute une gamme d'extractants susceptibles de recueillir différentes fractions. Celles-ci sont en équilibre dynamique entre elles et très conditionnées par la teneur en H<sup>+</sup>. Il y a passage d'une fraction à une autre, p.ex. par l'altération, mais c'est rarement réversible. D'ailleurs les nutriments n'existent pas forcément dans chaque phase. Aussi les rapports entre les diverses formes sont très complexes et l'on ne peut conclure des unes aux autres (DUCHAUFOR e.a. 1979:344; BANNISTER 1976:129). Mais on n'a pas encore rejoint de consensus quant au procédé à emprunter pour déterminer la disponibilité des nutriments du sol et les extractants les plus divers ont été employés dans les études sur la serpentine (BROOKS 1987:35).

#### Liens entre fractions obtenues par divers extractants

Les limites de validité des diverses méthodes, tout comme les processus complexes de la nutrition végétale, sont mal déterminés jusqu'à ce jour. La FAO poursuit un projet international de comparaison des méthodes (voir FAO 1979).

dans fraction sol	forme	location	disponibilité dans le sol	disponib. p.plantes	extractant	M	pH	sol: solu	fraction extraite
<.2% soluble	surtout anions év. chélates	dans la solution du sol	quantité très variable; lixiviable	mesure inférieure	lysimètre centrifugation				de la solution du sol
					eau			1:20	aquasoluble (~.1% tot)
					sels CaCl2 chlorur. NaNO3 nitrates KCl carbonat BaCl2 etc etc	.01 .1 .5	7.7 7. 8.2		"assimilable" >aquasoluble (p.ex.pour métaux l.de contaminatn)
2% échangeable adsorbée	surtout cations	sur argiles aux oxydes hydrox. matière amorphe sur mat.org	quantité assez constante; peu lixiviable	mesure supérieure	(acides dilués) acides organiques NH4OAc acétates NH4OAc lactates NH4OAc oxalates NH4-lact citrates NH4-oxal etc etc	1. 1. .5	7. 4.8 4.35 3.75 3.2	1:25	("disponible") échangeable (1-5% tot) (~10x aquasolubles)
98% fixe-mobilisable chélatée inaltérée	complexes peu/non échangeab/soluble/complexée totalement insoluble	dans la mat. organique	libéré par minéralisation	faible	complexon Na2EDTA	.02	7.0		complexée
		dans minéraux altérés	libéré par altération	faible	acides minéraux HCl (+) HNO3(+) H2SO4 etc	.1 à 2.		1:60	"totale" (~80% tot)
		dans minéraux inaltérés	non disponible	nulle					

Fig. 27

Disponibilité des éléments minéraux dans le sol et principaux extractants des diverses fractions par ordre de force.

*Availability of the mineral elements in the soil and principal extractants of the different fractions in order of strength.*

Par ailleurs il ne semble guère y avoir de règles générales : on a ainsi réussi à trouver de bonnes corrélations entre les teneurs des fractions les plus diverses et les teneurs ou comportement des plantes (voir par ex. PROCTOR e.a. 1975: 282,300,308 pour Ni, Cr, Co; et BROOKS 1987:35sq).

Il n'y a guère de rapport entre teneurs totales et échangeables, les teneurs totales n'étant même pas toujours plus élevées que les échangeables. On s'explique cela entre autres par les propriétés des minéraux primaires et par la redistribution différenciée des métaux dans les chélates des plus diverses origines, etc. (ERNST 1982:474sq, avec exemples).

Les extraits des teneurs échangeables sont admises donner une mesure de la limite supérieure des teneurs à disposition des plantes (ERNST 1974b:9), tout en permettant d'analyser la plupart des éléments à des concentrations relativement stables et à des conditions analytiques fiables. Bénéficiant d'une longue tradition, l'extraction de la fraction échangeable au NH4OAc 1M à pH 7 s'est ni plus ni moins généralisée pour les macro-nutriments cationiques, et plus récemment seulement pour les micro- et oligo-nutriments ou métaux lourds (ERNST 1982:474sq; ANDERSSON 1975:125) : un problème fréquent est le fait que leur extractibilité, tout comme leur disponibilité aux plantes, dépend beaucoup du pH de la solution, spécifiquement pour chaque élément, les macro-nutriments cationiques étant plutôt bien disponibles à pH basique (DUCHAUFOR e.a. 1979:409; fig. 28). Par ailleurs les valeurs échangeables varient selon l'ion échangeur (BaCl2, CaCl2, NH4OAc; SCHEFFER e.a. 1976:113) et augmentent avec la concentration de l'extractant.

En principe c'est la solution du sol en équilibre dynamique avec le revêtement en ions des particules du sol qu'on aimerait analyser, afin de s'assurer la

limite inférieure des nutriments sûrement à la disposition des plantes (DUCHAUFOR e.a. 1979:161sq; SCHLICHTING e.a. 1966:93). Or la lysimétrie n'est pas aisée, qu'on songe seulement aux sols pierreux, etc. Aussi simule-t-on volontiers la solution du sol en extrayant à l'eau dans un rapport sol:eau 1:20, bien que cela introduise des erreurs à cause des changements de solubilité et d'échanges cationiques (ERNST 1982:475) sans que j'aie trouvé d'exemples de serpentine. (Voir aussi PROCTOR 1971c:836 au sujet de Mg/Ca.)

Les extraits à l'eau valent très approximativement 10 fois moins que les teneurs échangeables. Mais les teneurs aquasolubles varient beaucoup selon la saison, les conditions de station, etc. (ERNST 1982:476sq, avec exemples). Par ailleurs les teneurs échangeables, qui ont certes le mérite de livrer des résultats relativement stables, s'accordent souvent mal avec les résultats écologiques : ainsi p.ex. PROCTOR (1971c:838, serpentine) a montré qu'une certaine concentration de Ni en solution peut être toxique, alors que la même concentration de Ni échangeable ne l'est pas encore. Aussi JOHNSTON et PROCTOR (1981:856) ont-ils extrait par centrifugation la solution du sol de serpentine à la capacité au champ, puis effectué des cultures hydroponiques aux concentrations trouvées : les résultats sont convaincants pour sols squelettiques riches en métaux lourds, en climat humide et frais. Les teneurs en nutriments de la solution du sol leur suggèrent des conclusions différentes quant aux causes chimiques de la particularité de la végétation sur serpentine que ne le suggèrent les teneurs échangeables.

Quant aux teneurs estimées en milieu plus ou moins salin ou acide dilué, censés livrer les limites maximales disponibles aux plantes, qu'on emploie surtout pour les métaux lourds des sols contaminés, elles sont sans rapport avec celles des autres extraits (HAENI, comm. orale; cf HAENI e.a. 1980) et mal adaptés pour les sols à métaux lourds (ERNST 1982:477; mais voir aussi BROOKS 1987:35). En ce qui concerne les extractions à l'EDTA, livrant les éléments complexés, elles ne répondent qu'à certaines questions précises (voir ANDERSSON 1975:133,134; DUCHAUFOR e.a. 1979:196sq).

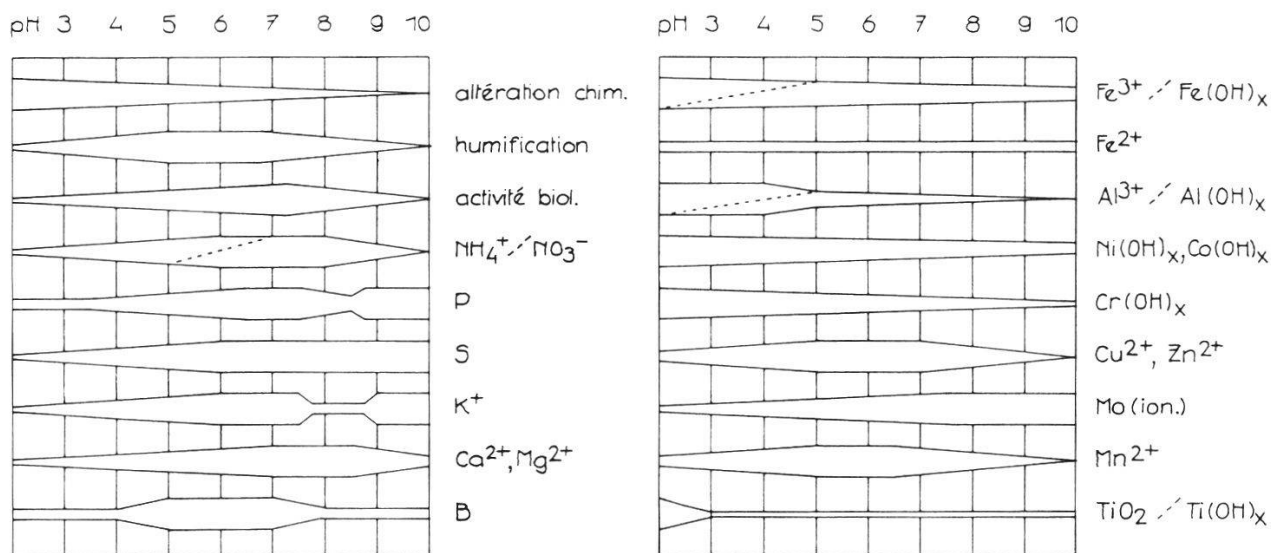


Fig. 28  
Effet du pH sur la disponibilité des éléments nutritifs minéraux dans le sol et sur la pédogenèse. Il n'y a pas de données fiables quant à la disponibilité en fonction du pH de Co Cr Ni pour les plantes en dehors des valeurs théoriques des solubilités de leurs hydroxydes qui sont dans l'ordre  $Co > Ni > Cr > Fe$  (BROOKS 1987:33sq). On ne sait néanmoins que très peu sur les formes sous lesquelles les plantes assimilent ces éléments. (Selon BAUMEISTER e.a. 1978:42; BROOKS 1987:34sq (ex THOMSON e.a. 1978); DUCHAUFOR e.a. 1977:40, 1979:17,31; LARCHER 1973:136 (ex SCHROEDER 1969); STRASBURGER 1983:335).

*pH effect on availability of mineral nutrients in the soil and on pedogenesis.*

### 3.2 Méthodes d'analyses de l'azote

#### 3.2.1 Azote total et minéralisé

Ntot Azote organique total : méthode Kjeldahl.

N est extrait par minéralisation de la matière organique au H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré, soit 1 g de sol pour 10 ml, dilué ensuite à 50 ml; neutralisé avec 50 ml de NaOH 30 % et converti quantitativement en NH<sub>3</sub>; absorbé dans 20 ml ou 30 ml d'HCl .05N; titré au NaOH .05N. (Dans la plupart des sols plus de 95 % de l'azote est lié organiquement, DUCHAUFOR o.c; N présent sous forme NO<sub>3</sub> n'est pas converti par cette méthode, HUMPHRIES 1956:479). STEUBING 1965:202 ou DUCHAUFOR e.a.1979:386,441; fig. 19 p. 38.

\*

Nm Azote minéralisé.

Prises d'essai récoltées environ toutes les 6 semaines pendant la période de croissance, de mi-juillet à début octobre (enneigement moyen à 2400 m : 8 mois). Prises mélangées et tamisées à 4 mm sur place, mesurées fraîches (Na) et après incubation : sur le terrain (T) 2 incubations successives sur 92 jours, en sachets de plastique; en chambre climatique (L) 3 incubations sur 128 jours, dans des bocaux en verre recouverts d'ouate, à 20°C et 95 % d'humidité relative. ELLENBERG 1964:83; STEUBING 1965:224; LEMEE 1967; RUNGE 1974:204; REHDER 1976a:414.

N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> minéral disponible : méthode colorimétrique.

Extraction d'un équivalent de 5 g de terre sèche avec 50 ml KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> à 1 %.  
Séparation de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par microdiffusion selon CONVAY 1962, complexation au réactif de Nessler, jaune, puis colorimétrie.  
Séparation de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> après réaction au xylénol 1-2-4, par distillation sous vapeur, puis colorimétrie.  
Analyse des échantillons frais aussi rapidement que possible, 3-4 jours après récolte, conservés en attente à +5°C. Valeurs brutes, annexe 3. Selon STEUBING 1965:205sq. Discussion des diverses méthodes et de leurs bonnes correspondances chez GERLACH 1980:198. La grande variété des teneurs en N minéral déjà sur une petite surface est bien connue (par ex. DUCHAUFOR e.a. 1979:386; LABROUE e.a. 1977:65).

\*

La minéralisation nette correspond au bilan entre ammonification, nitrification et dénitrification (s.l.), c.-à-d. à la partie de la minéralisation brute qui dépasse les besoins des micro-organismes eux-mêmes et qui est livrée à la disposition des plantes supérieures.

Nm = Nmb - Na

Nm : teneur en N minéralisé net

Nmb : teneur en N minéralisé brut (après incubation)

Na : teneur en N minéral momentané

Nm/p.v. : N minéralisé net au cours d'une période de végétation.

Remarquons que les francophones s'intéressent à Nm surtout dans l'optique de la microbiologie et du sol : de la microbiologie pour estimer l'activité microbienne du sol; du sol pour évaluer le degré d'incorporation de la matière organique au milieu minéral, comme indice du degré d'évolution d'un sol, c.-à-d. pour la classification des humus indispensable à la classification des sols. Ils considèrent l'azote minéralisé net lors d'une incubation de 6 semaines en conditions de laboratoire (28°C, humidité élevée, LEMEE 1967) comme une approximation de la "capacité maximale de minéralisation nette pour une période de végétation" (DUCHAUFOR e.a. 1977:56,59; cf LABROUE e.a. 1977:67 : 2 semaines en milieu alpin). Ils définissent un coefficient de minéralisation Nm/Ntot (azote total Kjeldahl).

Les germanophones et les nordiques s'intéressent à Nm du point de vue écologique de la productivité et des cycles des nutriments dans les écosystèmes (ELLENBERG 1977:80). Nm donne une idée de la vitesse du flux de N dans le cycle de l'écosystème (LARCHER 1973:129) et de l'"offre potentielle en N minéral net" pour les plantes supérieures (RUNGE 1974:204). La valeur de référence est Nm/p.v. : on additionne les Nm des incubations successives (de 6 semaines) au cours d'une période de végétation, à moins qu'on ne rapporte à la saison la moyenne des incubations séparées, le plus fréquemment pour les incubations sur le terrain. Nm est comparé avec les fluctuations de N dans la phytomasse et la litière ainsi qu'avec les pertes par lessivage au cours d'une saison de croissance (voir REHDER 1976a:411).

\*

Les valeurs de Nm employées dans ce travail p. 69 et annexe 3 se rapportent aux 3 incubations successives en chambre climatique s'étendant sur 128 jours (1977). GÖKCEOGLU (e.a. 1977:321) propose de réduire la période de végétation à la durée

ppm terre sèche			serpentine Davos				$\bar{N}m/42j$	$\bar{N}m/pv$ pv=128j	$\bar{N}m/pv$ pv=128j
nb			Nm/42 jours			$\bar{m}$			
			12.7	10.8	2.10				
			1e	2e	3e				
0-5cm se1	Na	8	4.2	4.2	3.2	3.9			
vég. I-IV	Nm T	8	6.3	2.9		4.6	14.		
2400 m	Nm L	8	15.	11.	9.3	12.	39.	35.	
0-5cm se2	Na	15	14.	15.	5.6	11.			
vég. V-VII	Nm T	15	13.	10.		12.	36.		
2300 m	Nm L	15	31.	36.	33.	33.	104.	101.	

ppm terre sèche			Caricetum firmae				$\bar{N}m/42j$	$\bar{N}m/pv$ pv=105j	Seslerio-Semperviretum 1200 m 2) $\bar{N}m/42j$	Caricetum ferrugineae 1200 m 2) $\bar{N}m/42j$
nb			Nm/42 jours							
			26.6	10.7	16.8	4.10				
			1e	2e	3e	4e				
0-5 cm	Na		6.5	7.9	5.6	3.0	5.2			
	Nm T		11.	4.2	2.9		6.2	16.		
	Nm L		19.	13.	6.9	52.	26.	64.		
0-15cm	Na		9.1	12.	8.5	5.6	8.0	8.6	8.6	
	Nm T		15.	13.	5.6		9.9	15.	20.	
	Nm L		29.	25.	16.	51.	32.	55.	51.	

Fig. 29

Azote minéralisé Nm : comparaison des incubations in situ (T) et en labo (L) pour la serpentine de Davos et 3 gazons sur calcaire d'après :

1) REHDER 1976:58 et 2) GÖKCEOGLU e.a. 1977:322,323

Valeurs transformées de g/cm<sup>2</sup> en ppm en assumant une densité du sol de .5 g/cm<sup>3</sup>

Na : teneur en azote minéral momentané.

Nm/p.v. : moyenne des incubations rapportée à une période de végétation p.v. (pour NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> voir fig. 40 p. 84).

*Nitrogen mineralization Nm : comparison of field incubation (T) and standard incubation in laboratory 20°C (L), (both 42 days), for the serpentine of Davos and 3 lawn communities on limestone, according to :*

*1) REHDER 1976:58 and 2) GÖKCEOGLU e.a. 1977:322,323*

*Values transformed from g/cm<sup>2</sup> to ppm assuming a soil density of .5 g/cm<sup>3</sup>.*

*Na : actual mineral nitrogen content*

*Nm/p.v. : mean incubation value reported to vegetation period p.v. (for NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> see fig. 40 p. 84).*



où la température dépasse 5°C. Pour Davos, à 2300 m ce sont 81 jours; à 2400 m 67 jours (p. 16). On peut s'attendre à une minéralisation additionnelle en dehors de la période de végétation, en particulier sous l'impact du gel (voir GERLACH 1973, REHDER 1975:95; REHDER e.a. 1978:324), sans doute en liaison avec l'aération du sol qui favorise la nitrification (LABROUE e.a. 1977:67).

Les valeurs Nm des incubations sur le terrain (T) sur serpentine sont en gros un tiers de celles des Nm potentiels obtenues en incubation à 20°C (L) et correspondent bien aux valeurs sur calcaire de REHDER et GÖKCEOGLU, voir fig. 29 et 40 à 42 p. 84sq.

Quant à l'azote minéral momentané Na, sur serpentine il est du même ordre de grandeur que Nm(T) minéralisé en 6 semaines. Cela vaut également pour le Caricetum firmæ cité, alors que Na est moins élevé que Nm(T) dans les étages inférieurs, ici montagnard, voir fig. 29 et 40. La favorisation de la nitrification dans les échantillons tamisés des incubations est discutée p. 92.

Afin de convertir les données de ppm en N/surface, j'ai assumé une densité du sol  $d = .5 \text{ g/cm}^3$  (cf p.ex. LARCHER 1977:312), coefficient sans doute encore élevé si l'on songe que le sol est très squelettique et que les valeurs de N n'intéressent que la fraction < 4 mm. En tenant compte de l'épaisseur de l'horizon récolté  $h_0 = 5 \text{ cm}$  :  $1 \text{ ppm N} = h_0 \cdot d \cdot 10^{\text{exp}-2} \text{ g N/m}^2 \text{ sol} = .025 \text{ g/m}^2$ .

### 3.2.2 Densité de germes du sol

Récolte des échantillons de 4 sols d'altitude et d'exposition comparables, le 18.9.78; carottage de l'horizon de surface jusqu'à 2 cm à l'aide d'une grosse seringue transformée pour cet usage. Les comptages ont été effectués sur plaques, les milieux de culture sélectifs additionnés d'extrait de terre-mère. Analyses faites avec le Dr HANSELMANN, selon les méthodes de l'Institut de biologie végétale de l'Université de Zurich.

échantillons	coordonnées	altit.	exp.	lieu
se1 serpentine	782.31/189.96	2290	E	Totalp E TE relevé 108 unité V
se2 serpentine	782.16/189.77	2260	SSE	Totalp SE TH relevé 118 unité VIa
si silicates	782.33/188.68	2295	SE	Salezernhorn SA
ca carbonates	781.72/191.64	2290	SE	Parsem PA

milieux sélectifs (g/l)		milieu de base (g/l)	
fi fixatrices d'N <sub>2</sub>	: 16.7 mannite	1.	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
ch champignons	: 60. saccharose	.2	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
	10. extrait de levure	.2	NaCl
	4. NaNO <sub>3</sub>	.05	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O
ac actinomycètes	: 20. amidon	.02	CaCl <sub>2</sub>
	4. KNO <sub>3</sub>	.002	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O
	3.6 NaCl	.001	NaMoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
	.6 caséine	10.	sol de Davos
	.04 CaCO <sub>3</sub>		
hé hétérotrophes	: 20. peptone		
	10. glucose		
	2. extrait de levure		
am ammonifiantes	: 100. hydrolysate de caséine (pancréatique)		
ni nitrifiantes	: 5. (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	1. NaHCO <sub>3</sub>		
dé dénitrifiantes	: 20. glucose		
	10. CaCO <sub>3</sub>		
	4. KNO <sub>3</sub>		
			milieu de base:sélectif 1:1 tamponné au pH du sol 5 répétitions détails fig. 43 p. 89.

### 3.3 Méthodes d'analyses pédologiques

#### 3.3.1 Profils pédologiques

Les profils ont été choisis en particulier en fonction des différentes sortes d'altération de la roche, et ensuite en fonction de la végétation. J'ai renoncé à faire des profils sous les types de végétation rares ne couvrant que quelques m<sup>2</sup>. Il s'agit malencontreusement des végétations les plus développées, sous lesquelles on peut s'attendre à des sols plus différenciés.

L'étude morphologique des profils a été effectuée selon DUCHAUFOR 1960:356sq. J'ai étendu à la serpentine les définitions des types de sols de cet auteur (définitions et équivalences avec d'autres systèmes de classification p. 96).

Comme la fraction  $\geq 2$  mm (définition officielle du squelette ou pierrosité) est dans tous les profils en prédominance écrasante, j'en ai distingué la fraction gravier (2 mm à 2 cm) à part, et je réserve ici le terme squelette à la fraction  $\geq 2$  cm. Quant aux distributions granulométriques de surface, indiquées dans l'entête du tableau de la végétation (annexe 4; p. 138), elles peuvent s'écarter passablement de celles des horizons inférieurs (p. 98sq et remarque p. 102). La texture figurant en face des profils (p. 98sq) a été estimée en frottant la terre fine entre les doigts selon le diagnostic de SCHLICHTING e.a. 1966:21. L'interprétation de la couleur brune de la terre fine des sols s'est avérée délicate sur le terrain. La couleur de la roche serpentine à l'état frais oscille entre bleu-vert-noir-gris. L'altération chimique lui confère toute la gamme des bruns, de l'ocre à la rouille jusqu'au brun sombre, vraisemblablement surtout sous l'influence de la libération et de l'oxydation du fer (qui contribue à quelque 8 % de la roche!). Aussi les couleurs des sols tirant vers le roux ont-elles été interprétées plutôt comme libération de sesquioxydes, celles vers le gris-noir comme humus (voir p. 100 et p. 102).

#### 3.3.2 Granulométrie et texture

La composition granulométrique (ou dispersité) est définie d'après la proportion des particules du sol classées par grosseur. Les particules sont assimilées à des sphères de quartz, il s'agit donc d'"équivalences" de diamètres. Elle est destinée à définir la texture du sol et n'intéresse que la fraction de terre

mm	.002	.0063	.02	.063	.2	.63	2.	6.3	20.	63.	200.		fraction
argile	limon		20 $\mu$	arène sable fin	arène sable gros.		gravier			cailloux galets	blocs		Assoc.intern. Sci.du Sol 1)
clay	silt		r 50 $\mu$		sand		gravel			pebble	blocks		USDA=franco- anglosaxon 2)
Ton	Schluff		63 $\mu$		Sand		Kies			Kiesel	Blöcke		allemand 3)
terre fine							squelette*						
sédimentation							tamisage						méthode

1) SCHEFFER e.a. 1970:19.21      2) DUCHAUFOR e.a. 1979:231

3) SCHLICHTING e.a. 1966:80,81 et 1)

r limite retenue, retained limit.

\* squelette=pierrosité ici  $\geq 2$ cm, skeleton here  $\geq 2$ cm, cf. p. 54.

Fig. 30  
Classes granulométriques. *Granulometric classes.*

fine, sous-entendu après dispersion des agrégats définissant la structure, après calcination et éventuellement décarbonatation.

\*

Méthode ANDREASEN modifiée.

1 Prétraitement de la terre fine : oxydation de la matière organique au H2O2 30 % (voir p. 42, C org.), les échantillons en contenant >20 % chauffés 10 min à 300°C; puis séchage à 105°C. Dispersion des agrégats au calgon Na2P2O7 1 %, sol:solution 1:10 (couramment plus concentré : Na2P2O7 3-4.5%, s:sn 1:1.25-2.5).

2 Tamisage sous l'eau des sables :  
séparation en 5 fractions : 1. > .5 > .25 > .125 > .05 mm

3 Sédimentation : détermination des limons et des argiles sur la base de la loi de STOKES qui dit que la vitesse de sédimentation est proportionnelle à la grosseur des particules. A l'aide d'une pipette calibrée :

prise après 9 min à 19.6 cm : particules <.02 mm, soit limon+argile

" " 2 h à 2.6 cm : particules <.002 mm, soit argile.

Les valeurs sont rapportées à la terre calcinée, non décarbonatée, séchée à 105°C. La calcination entraîne des pertes de poids de .3 à 30 % (voir C p. 43), les pertes les plus fortes correspondant surtout aux sols les plus riches en argile, fig. 47-8 p. 109. Les erreurs de mesures n'ont pas été estimées. La 6e fraction de tamisage, <.05 mm, n'a pas été mesurée. Les fractions ont été conservées en vue d'une éventuelle analyse minéralogique. Selon : DUCHAUFOUR e.a. 1979:229sq; SCHLICHTING e.a. 1966:77sq; SCHEFFER e.a. 1977:18sq.

\*

Hiatus entre sédimentation et tamisage

Les courbes cumulatives des textures, p. 107, accusent, à mesure que les sols sont plus développés, un saut de plus en plus marqué entre les valeurs acquises par tamisage et celles par sédimentation. Si les agrégats étaient insuffisamment dispersés, la solution dispersante ayant été faible, on pourrait s'imaginer les retrouver dans les fractions supérieures, ce qui ne devrait pas créer de hiatus. Quel rôle joue le seuil de changement des propriétés des particules vers .05 mm dont parle DUCHAUFOUR 1960:25 ? Quant à la composition minéralogique dans la formule de STOCKES, l'emploi de la densité du quartz à la place p.ex. de l'augite entraîne une surestimation des diamètres d'un facteur 1.23; c.-à-d. que le limon mesuré est <.016 mm au lieu de .02, l'argile mesurée <.0016 au lieu de .002; soit une sous-estimation des fractions limon et argile qui corrigerait assez ce hiatus, voir p. 107. A l'inverse, la structure feuilletée des particules - les minéraux de serpentine ont une structure en lamelles et bâtonnets - entraîne un ralentissement de leur sédimentation, faisant ainsi apparaître ces fractions dans des classes à diamètre inférieur, d'où surestimation de ces dernières. Par ailleurs les différentes fractions granulométriques peuvent être de composition minéralogique différente (voir sols de serpentine chez STICHER 1978:8; 1981:35; e.a. 1986:285; p. 115).

$$\text{Loi de STOCKES : } v = \frac{h}{t} = \frac{2}{9} \cdot \frac{(d_1 - d_2)G}{n} \cdot r^2 = 35'930 \cdot r^2$$

v	[cm/sec]	: vitesse de chute des particules
h	[cm]	: hauteur de chute
t	[sec]	: temps mis pour cette chute
G	[980cm/sec <sup>2</sup> ]	: accélération terrestre
n	[g/cm.sec]	: viscosité du liquide (eau : .01, ici solution à .2 % calgon) dépend de la température
r	[cm]	: diamètre des particules
d2	[g/cm <sup>3</sup> ]	: densité du liquide (eau : 1.00) dépend de la température
d1	[g/cm <sup>3</sup> ]	: densité des particules (ici quartz)
d1	quartz	: 2.65 (voir fig. 46 p. 107)
	calcaire	: 2.7 - 2.8
	serpentine	: 2.5 - 2.65
	augite	: 3.5
	olivine	: 3.2 - 4.4

\*

Triangle des textures.

Les trois fractions principales de la terre fine sont le plus souvent représentées en triangle, la limite supérieure des limons étant en fait choisie dans les divers pays de manière à représenter les sols selon la répartition la plus différenciée (SCHEFFER e.a. 1970:20), fig. 48-1,2 p. 110. L'ancienne limite à .02 mm, permettant une subdivision élégante, a fait place à .05 mm, cette dimension correspondant à un changement précis des propriétés des particules cité ci-dessus. Par ailleurs .063 mm divise l'espace géométriquement en deux sur une échelle logarithmique, avantage pour la représentation en courbe cumulée, voir p. 107. Les différences que peuvent occasionner ces variations de limite sont illustrées à l'exemple de mes sols de serpentine dans la fig. p. 110 des systèmes de classification sur les triangles de textures. Je m'en suis tenue à la classification franco-anglosaxonne, qui correspond à une répartition plus différenciée de mes sols.

\*

Coefficient de finesse F'.

Afin de résumer la texture d'un échantillon en une seule valeur, j'ai repris le degré de finesse F (SCHLICHTING e.a. 1966:81) et modifié la formule pour obtenir F'=100 pour 100 % d'argile; F'=0 pour 100 % de sable. Autrement dit, en prenant la projection perpendiculaire sur le côté du triangle allant des sables (S) aux argiles (A), (limon L) soit :

$$F = 1/4 (3A + 2L + S + 100)$$

$$F' = 1/2 (3A + 2L + S - 100) = A + 1/2L \text{ etc}$$

Fig. 47-1 p. 108 illustre la correspondance entre F' et textures sur le triangle.

### 3.4 Méthodes des relevés de végétation

L'analyse phytosociologique de la serpentine a été effectuée selon les mêmes méthodes que les travaux sur carbonates et silicates de VETTERLI 1981 et 1982. Les relevés phytosociologiques empruntent les méthodes de BRAUN-BLANQUET, selon la présentation de MUELLER-DOMBOIS e.a. 1974. Elles sont discutées en détails chez ces derniers, ainsi que chez GUINOCHE (1973:159sq, épistémologie de la phytosociologie), auquel il est renvoyé pour la terminologie française.

L'unité de base de l'échantillonnage est une analyse floristique semi-quantitative d'une surface homogène et représentative, soit une liste d'espèces déterminables y apparaissant, avec estimation de leur fréquence et recouvrement. On associe à ces relevés, à divers degrés, des observations et mesures relatives à la station.

#### 3.4.1 Choix et caractéristiques des parcelles

M'étant posé comme but de décrire la végétation alpine sur serpentine sous toutes ses facettes, j'ai choisi les lieux où effectuer mes relevés en essayant de considérer : les diverses pentes, expositions, altitudes; les diverses humidités; les différentes granulosités et états d'altération du substrat. De retenir tous les lieux où il y avait de la végétation, en particulier tous les degrés de couverture, des végétations les plus clairsemées aux formations fermées. Localisation des parcelles, p. 28 et annexe 4. Mes relevés diffèrent ainsi de ceux de BRAUN-BLANQUET qui lui s'intéresse avant tout aux formations typiques, afin de livrer des associations à validité plus générale.

A cause du relief les parcelles sont principalement exposées à l'E, SE, et souvent au S, N et NE : en effet les deux crêtes principales sont orientées vers l'E et le SE; l'éboulement de Totalp a défini un grand flanc E. Bien que couvrant de grandes surfaces, les pentes S raides, entre 2300 et 2500 m, à pierriers grossiers, sont relativement peu représentées parce qu'elles sont pour

ainsi dire dépourvues de végétation. L'ampleur des divers types de stations est très variable. Toutes ont été retenues, même les rares stations fontinales, à gîtes d'animaux, etc. Pour l'ensemble, la densité des relevés s'approche des 30/km<sup>2</sup>, soit près de 10 fois moins que chez VETTERLI 1981 et 1982:8, pour ses végétations à recouvrement bien supérieur et destinées à être cartographiées. A la serpentine sans influences étrangères échoient 138 relevés.

Un gros problème a été de juger de l'homogénéité des surfaces. Dans cette région à très faible colonisation végétale sur la majorité de son étendue (la moitié des relevés a des recouvrements inférieurs à 5 %, et seulement un cinquième supérieur à 50 %), la roche affleurante, les éboulis, l'inhomogénéité tant de la granulométrie que du type de roche et d'altération offrent un choix de microsites les plus divers. A cela s'ajoute la répartition inhomogène des plantes elles-mêmes, elles peuvent p.ex. former des agrégats autour de quelqu'individu de buisson nain rampant. Et dans les surfaces à guirlandes de terrasses, si les replats sont peu colonisés, les talus sont généralement particulièrement bien fournis. Je me suis décidée à envisager des surfaces entières plutôt que des niches séparées de leur environnement immédiat, quitte même à garder des inhomogénéités dues à des facteurs extérieurs tels les animaux. Aussi les critères d'homogénéité sont-ils moins rigoureux que ceux applicables à la sociologie des gazons.

Sur la base du critère essentiel de l'homogénéité, la surface des relevés a été fixée à des carrés de 10, 25, 50 ou 100 m<sup>2</sup>. J'ai choisi une surface plutôt supérieure à l'aire minimale (cf MUELLER-DOMBOIS e.a. 1974:47), étant intéressée, en plus de la sociologie pure, à la présence des espèces en soi. Si 10 m<sup>2</sup> contenaient en général suffisamment d'informations en cas de couverture élevée, 100 m<sup>2</sup> ont souvent été nécessaires en cas de couverture minime.

#### 3.4.2 Relevé des données de végétation

La plupart des relevés a été parcourue au moins deux fois, entre juin et septembre, deux années différentes, une fois en début de saison et une autre en fin de saison. Ils s'étagent sur cinq années. Le meilleur moment pour les relevés s'est avéré être août à septembre, les espèces même tardives étant suffisamment développées pour être plus aisément déterminables, et les espèces précoces encore reconnaissables, même si déflorées ou passablement fanées.

Comme je destinais ces relevés à une exploitation à l'aide de l'ordinateur, j'ai pris les données directement sur formulaires du format des cartes à perforer. La base en constituait une liste alphabétique des plantes susceptibles d'être trouvées au niveau alpin à Davos (annexe 7). Adjoint à cela, une liste des caractéristiques de station (annexe 4).

\*

Afin de permettre une comparaison d'abord entre tous mes relevés, puis avec ceux de la littérature, j'ai choisi l'indice simple de BRAUN-BLANQUET, avec son estimation combinée de la dominance et de l'abondance.

% de recouvrement	indice	précisions, pour végétation :	
		clairsemée	dense
inférieur à 1	.	1-2 individus	1 seul endroit
inférieur à 1	+	3-10 individus	présence frappante mais <<1 %
1 - 5	1		
5 - 25	2		
25 - 50	3		
50 - 75	4		
75 -100	5		

Dans cette échelle de recouvrement, pour des raisons graphiques, le . remplace le r de BRAUN-BLANQUET. Pour des raisons de format de formulaires, les recouvrements de végétation inférieurs à 1 % ont été assimilés à 1 %. Cela touche en particulier quelques relevés de l'unité Ic.

La physionomie et la structure de la végétation ont fait l'objet d'observations à part. L'indice de recouvrement des espèces de JOCHIMSEN 1970, qu'elle a développé pour la végétation des avant-postes des glaciers, conviendrait en principe aux peuplements clairsemés de la serpentine : il rapporte le taux de recouvrement de chaque espèce non à la surface, mais à la végétation. Optimal pour des études de succession, cet indice se prête néanmoins mal à une étude sociologique d'un spectre de végétations allant des plus éparses aux gazons.

### 3.4.3 Relevé des données de station

Les stations des relevés de végétation ont été caractérisées d'une part par des observations et estimations dont l'essentiel figure dans l'en-tête du tableau de la végétation (p. 128, 138, annexe 4) - d'autre part, pour un choix de relevés, par des analyses de sol et par quelques profils (p. 98 à 105). Pour chaque relevé j'ai noté en outre des remarques sur l'homogénéité; la situation dans le relief du terrain, apports et exports; la roche et le sol; sur l'humidité et là où c'était possible sur l'enneigement; sur le pâturage et les influences externes; ainsi que des observations sur les microniches des espèces.

Toutes ces données m'ont aidée autant à organiser qu'à mieux démarquer et décrire les groupements de végétation d'après les conditions de station, en accord avec la structuration et la classification floristique (comme chez VETTERLI 1982:23). Elles ont servi en outre à calculer et comparer des similitudes entre séries de données stationnelles et floristiques (p. 149).

### 3.5 Traitement des relevés de végétation

Buts poursuivis lors de l'élaboration du tableau de la végétation sur serpentine (fig. 53 p.128) :

- 1 Regrouper de manière détaillée la végétation en unités clairement descriptibles, à combinaison d'espèces et à station caractéristiques, en essayant de créer un tableau graphiquement aussi suggestif que possible.
- 2 Documenter le mieux possible la transition d'une végétation clairsemée à une végétation plus développée.
- 3 Dégager les corrélations les mieux interprétables entre garniture d'espèces et combinaison d'un choix de facteurs de station.
- 4 Permettre de situer la flore et la végétation des unités obtenues avec les catégories reconnues sur d'autres substrats et en d'autres lieux.

En résumé, j'ai effectué une ordination purement floristique, partiellement à l'aide de techniques mathématiques (p. 65), puis recouru à une comparaison tabellaire et enfin classifié empiriquement, partiellement à l'aide des données de station.

Tableaux empiriques. Si les initiateurs de la phytosociologie autour de BRAUN-BLANQUET employaient des méthodes empiriques à peine systématisées dans le triage, c.-à-d. l'interprétation de leurs relevés, c'est qu'ils n'avaient pas de difficultés majeures puisque les relevés aient été pris en vue d'explicitier des groupements végétaux plus ou moins typiques, déjà préalablement reconnus (correspondant à une classification). Leurs tableaux correspondent ainsi plutôt à un moyen de présentation des relevés. Significativement, BRAUN-BLANQUET, n'a jamais décrit de système de triage.

Similitudes numériques. Or c'est différent s'il s'agit par exemple d'établir l'inventaire complet des groupements végétaux d'un territoire et justement d'apporter des précisions dans leur discrimination (cf VETTERLI 1982:75). Les tableaux de ces relevés-là sont devenus de véritables instruments de travail pour comparer et trier les relevés jusqu'à les distribuer en catégories de composition floristique similaire (cf GUINOCHE 1973:17). Aujourd'hui les phytosociologues s'adressent résolument aux techniques numériques les plus raffinées, basées sur des calculs de similitudes, et organisent plus systématiquement leurs données. J'ai participé activement à ce tournant depuis les premiers relevés que j'ai pris sur serpentine en 1974. Puis s'est posé pour moi le problème épineux du moment et de la manière d'intégrer les données de station, surtout édaphiques, dans l'analyse de la végétation. Cette question méthodologique, hors du cadre de ce travail, a fait l'objet de nombreuses publications postérieures à mes relevés de données.

### 3.5.1 Ordination tabellaire

Le chemin principal a été une ordination floristique en une suite de relevés et d'espèces, à la main - travail d'ailleurs véritablement fastidieux. Pour ce système empirique de comparaison tabellaire, basé sur une appréciation subjective des similitudes, je me suis référée à ELLENBERG 1956; MUELLER-DOMBOIS e.a. 1974; OZENDA 1964; GUINOCHE 1973:17sq.

J'ai tenté de dégager des gradients aussi simples et linéaires que possible, tout en gardant la primauté à la transition de la végétation clairsemée à plus dense. Les quelques gradients reconnaissables se chevauchant, j'ai également travaillé avec des tableaux partiels, à gradients simples, en introduisant certains relevés à caractères intermédiaires dans plusieurs de ces tableaux (p. 144). J'ai plutôt respecté présence/absence qu'indices de recouvrement. Puis essayé de garder ensemble les espèces qui me semblaient liées à une même écologie, même si à fréquences diverses.

Il est clair qu'en traitant les données à la main, on mélange presque inévitablement à l'ordination une part de classification. Par exemple, en employant les lacunes ou les accumulations distinctes d'espèces ou de relevés.

### 3.5.2 Classification

La classification, tant des relevés que des espèces, a été faite empiriquement, sans aide mathématique. Et contrairement à l'ordination restée purement floristique, elle a profité, dans la phase d'interprétation, des données supplémentaires de station. La grandeur des groupes est définie d'après les données floristiques et la capacité d'explication stationnelle qui a pu leur être attribuée.

Relevés. Dans une première approche, des groupes ont été proposés d'après les seules similitudes floristiques. Puis j'ai confronté ces groupements préliminaires aux données de station des relevés. Ces données supplémentaires ont servi à dégager une interprétation écologique, afin de mieux constituer et situer des groupes aussi homogènes que possible, distincts d'une part floristiquement, d'autre part pour lesquels je pouvais reconnaître des caractéristiques de station différenciées. A ce point, j'ai réordonné d'après les données de station quelques rares relevés floristiquement peu évidents à placer.

Espèces. Sur serpentine, les espèces ont révélé des réactions individuelles. Peu sont à comportement très semblable. Aussi le but des regroupements d'espèces est-il d'abord d'en simplifier la description et de permettre de réordonner les tableaux partiels (p. 144 et 145). J'ai essayé de dégager le comportement stationnel commun aux relevés où ces espèces étaient représentées. Je l'ai ensuite confronté aux observations sur le comportement des espèces dans les microsites.

Evidemment, l'élaboration n'a pas suivi le chemin rectiligne décrit ci-dessus. Bien souvent certains pas ont suggéré un retour en arrière, proposé une meilleure structuration à un stade antérieur. Par exemple, améliorations dans l'ordination après certaines solutions de classification, en particulier à partir des tableaux partiels. Une des principales difficultés rencontrées ici provient de la structure même de mes données non discrètes, prélevées dans le but de documenter les passages et les multiples facettes de la végétation - choses malaisées à séparer ou résumer en groupes. La classification proposée est donc différente (et moins arbitraire) que celles de BRAUN-BLANQUET.

\*

Description des groupes. La classification était donc censée livrer des groupes destinés à la description et à la comparaison avec la littérature. Vu les motifs du choix des relevés et l'échelon régional de la végétation sur serpentine envisagée, la description de la végétation fait appel avant tout à des caractéristiques de station, ainsi qu'à quelques considérations physiologiques. Pour les groupes de relevés, la qualification dérive des données de station prélevées simultanément; pour les groupes d'espèces, en plus, des observations sur le comportement face aux microniches.

L'intérêt écologique sous-jacent à ces études transparait. Cela ne fait que se baser sur l'hypothèse que la composition floristique d'un relevé est avant tout déterminée par les conditions de station. Y reste latent le danger de tautologies.

### 3.5.3 Valeurs indicatrices des espèces

Afin de pouvoir sonder les habitudes, sur substrats communs, des espèces rencontrées sur serpentine, j'ai analysé leurs valeurs indicatrices d'après celles de LANDOLT 1977 pour les espèces vasculaires de la Suisse. Ces valeurs sont des estimations empiriques, qualifiant les stations habituellement fréquentées par les espèces (portée de ces valeurs, o.c:46). Elles sont accompagnées de la caractérisation de la forme biologique de celles-ci. Pour chaque relevé j'ai calculé la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes, d'après les pondérations et propositions de LANDOLT 1977:64, (p. 142). Puis j'ai traité ces moyennes des relevés avec l'analyse factorielle des correspondances, p. 160 (cf PERSSON 1981 et VETTERLI 1982:57-59). Il s'en est dégagé une structure plus claire que pour les données floristiques seules, bien interprétable. Ce procédé est vivement recommandé pour une première ordination de la végétation.

## 3.6 Détermination des espèces et liste floristique de Davos

### 3.6.1 Détermination des espèces

Vasculaires : Flore de la Suisse de HESS e.a. 1976-80. Elle ne retient que des espèces et diffère donc bien des flores étrangères ou anciennes par sa conception étroite, mais concise et claire, de l'espèce. Par exemple les taxons morphologiquement et écologiquement suffisamment différenciés et bien documentés sont élevés au rang d'espèces, alors que les variétés et autres subtilités infraspécifiques non confirmées par des cultures expérimentales n'y sont pas retenues (E. LANDOLT, oralement). Cela empêche des parallèles avec ces autres flores, mais aussi des comparaisons fallacieuses (critique chez STACE 1980:207). Nomenclature selon HESS e.a. 1976-80 (cf liste floristique, annexe 7).

Festuca : Madame I. MARKGRAF-DANNENBERG a eu la gentillesse de m'aider dans la détermination des Festuca et de quelques graminées difficiles. Aussi la nomenclature à trois termes (ssp, etc.) des Festuca se réfère-t-elle à sa publication



de 1978.

Mousses : Des échantillons de mousses (et de lichens) de tous les relevés ont été prélevés. Monsieur E. URMI a eu l'obligeance d'en déterminer les genres, afin d'en donner une vue d'ensemble préliminaire. Nomenclature selon AUGIER 1966 et BERTSCH 1966.

Lichens : J'en dois la détermination à Monsieur Ph. CLERC. Terminologie selon OZENDA e.a. 1970.

Champignons : Le seul exemplaire rencontré a été identifié par Monsieur E. HORAK.

\*

Difficultés de détermination.

Significativement, les espèces sur serpentine et substrats intermédiaires sont fréquemment à caractères atypiques ou intermédiaires, la plupart du temps réduits, souvent sans fleurs ou à seule reproduction végétative. De plus, les caractéristiques écologiques auxiliaires de la description des espèces, se résumant le plus souvent à la grande césure entre acidicoles/basicoles, ne sauraient servir (illustrant d'ailleurs le risque de tautologie qu'il y a à vouloir ajouter des caractères écologiques pour définir des classifications taxonomiques, cf SNAYDON 1973:23).

Dans bien des cas, les hésitations d'identification touchent des paires de vicariants ou à comportement de ce type - où les différenciations écologiques sur serpentine ne correspondent plus toujours à des caractères morphologiques clairement distincts : les cas les plus fréquents sont *Silene exscapa/acaulis*, *Ranunculus Grenierianus/montanus*. Le plus souvent d'ailleurs les deux membres de la paire sont présents soit à peu de distance, soit même en mélange.

### 3.6.2 Liste floristique de Davos

La liste alphabétique des plantes susceptibles d'être trouvées au niveau alpin à Davos, mentionnée p. 57, a été élaborée à partir de SCHIBLER 1937 et LANDOLT (oralement) ainsi que d'excursions préliminaires.

La liste floristique des plantes vasculaires alpines de Davos (annexe 7) en dérive. Elle rassemble les espèces de l'étage strictement alpin, c.-à-d. au-dessus de la limite potentielle de la forêt, soit au-dessus de 2200 m sur serpentine, au-dessus de 2300 m sur les autres substrats. Elle couvre les régions de Davos-Parsenn, Totalp, Gotschna, Strela-Steintälli, Schiahorn, Strela, Chüpfenfluh, Wannengrat, Chörbschhorn, Jakobshorn, Rinerhorn (carte p. 26). La colonne SE provient de mes propres relevés; les colonnes SI, CA, SH de VETTERLI (1981, 1982) qui s'est concentré sur les gazons, il se peut donc que certaines espèces des éboulis, surtout des fougères, y manquent, ou figurent seulement avec un ".". Il s'agit d'une liste tirée d'un travail avant tout sociologique, où les espèces singulières ne sont pas expressément recherchées.

## 3.7 Méthodes d'analyses phytochimiques

### 3.7.1 Récolte, provenance, préparation des plantes à calciner

Les 34 espèces (96 populations) proviennent de 4 substrats différents, de l'étage alpin inférieur autour de 2300 m, de lieux où végétation clairsemée et dense se succèdent sur un petit espace (situation des placettes et analyses des sols fig. 69. p. 167).

- Serpentine : plantes récoltées sur le flanc E du Totalphorn entre les relevés se 98 IVb et 109 V du tableau de la végétation p. 128 (sols se1 et se2); quelques espèces des gazons vers le relevé 129 VIIa (sol se3); ainsi qu'une

deuxième population de *Cerastium latifolium* et de *Viola calcarata* sous le Weissfluhjoch vers 2600 m, entre les relevés 35 et 36 Ic.

- Ophicalcite : plantes récoltées dans une zone d'ophicalcite verte et de serpentine à veines de calcite blanche, au NE du Totalphorn (au NW du relevé 125 VIIa à influences d'ophicalcite (sol op2), dont la végétation se distingue de celle sur serpentine adjacente seulement par quelques espèces calcicoles en plus; une deuxième population de *Linaria alpina* vient du haut du Hauptertälli, d'un mélange à 50 % de carbonates et de serpentine (sol op1 peu développé, à titre représentatif).
- Silicates : plantes récoltées vers le paravalanche du Salezerhorn (sol si3); quelques espèces des éboulis dans le Hauptertälli, coord. 780.20/188.22, 2380 m, exposition W (sol si1 éboulis du Salezerhorn, à titre représentatif); *Silene Willdenowii* au Grüenturm à influences de calcschiste (sol si2).
- Carbonates : plantes récoltées au Strela (sol ca1); quelques-unes au Schiawang (sol ca2).

Les populations ont été prélevées simultanément en fin d'été (30.9.75), après la floraison pour prendre l'état adulte épanoui, soit 5 individus au minimum, sur moins de 10 m<sup>2</sup>. Dans l'espace d'1-2 jours, les plantes entières ont été soigneusement rincées à l'eau courante, en évitant de perdre trop de racines fines; séchées au four à 105°C entre des feuilles de papier; puis conservées ainsi jusqu'au moment de l'analyse, 3 ans plus tard.

D'abord coupées aux ciseaux, les plantes ont été pulvérisées au moulin à café, tamisées à .5 mm, et les parties lignifiées passées au moulin Culatti tamisant à 1 mm, afin d'éviter que les parties trop grosses n'exploient dans le fourneau. On n'a pas tenu compte des contaminations en Fe et Al dues à ces instruments.

élément	état des pl.	broyé	mesuré en n séries	durée de conservation	répétition	prise	plantes: solution de l'extraction	calcination ou extractants et leur concentration (initiale) finale
métaux (Si)	sec	+	1	3a	2	2 g	1:25	20h 450°C; (4ml HCl conc) 8% HCl
N	sec	+	1	3a	3	50 mg	1:80'000	2h 600°C (1ml H2SO4 conc). 0.25% H2SO4
P	sec	+	1	5a	3	50 mg	1:2'000	(1ml H2SO4 conc) 1. % H2SO4
element	dried plants	ground	measured in n series	duration of conservation	repetition	sample	plants : solution of extraction	calcination or extractants and their (initial) final concentration

Fig. 31  
Conditions d'analyse des plantes (a = année).  
Conditions of plant analysis (a = year).

### 3.7.2 Calcination des plantes et dosage des métaux

Calcination sèche selon HUMPHRIES (propre adaptation) : cations métalliques.

2 g de poudre de plantes sont lentement carbonisés, en augmentant la température sur 5 h, dans un four à couvercle ouvert, sans dépasser les 300°C avant que la carbonisation ne soit achevée; puis amenés à 450°C et calcinés à cette température pendant 20 h, couvercle clos; les cendres pesées à la fin.

Très légères, les cendres sont mouillées de quelques gouttes d'H<sub>2</sub>O pour qu'elles ne moussent ni ne s'envolent lors de l'attaque avec 4 ml d'HCl concentré; lavées à travers un filtre et complétées à 50 ml (compromis entre concentration aussi faible que possible en HCl et dilution minimale des oligo-éléments); puis diluées de manière appropriée pour les mesures. Adaptation, après plusieurs essais, de HUMPHRIES 1956:471sq.

Adjonction aux solutions finales, pour la détermination par absorption atomique au spectrophotomètre de flamme (selon les instructions du SAA PERKIN-ELMER, cf p. 44), pour les analyses de :

- Na et K : 1 % v/v Cs<sup>+</sup> (CsCl)
- Ca, Mg, Fe : 1 % p/v La<sup>3+</sup> (La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)
- Cr : 2 % p/v NH<sub>4</sub>Cl
- Al : 1 % v/v KCl
- Mo : 1 % p/v NH<sub>4</sub>OH

Estimation de Al Ca Cd Co Cr Cu Fe K Mg Mn Mo Na Ni Ti V Zn. Deux prises d'essai par population a et b, les a mesurés ensemble, puis les b. (Mo sans répétitions; Ti et V seulement pour certains échantillons). Valeurs brutes annexe 6.

Afin d'avoir une mesure approximative de la silice, <SiO<sub>2</sub>>, sans recourir à l'extraction problématique par HF, on a mesuré les résidus sur les filtres recalcinés à 600°C (filtres spéciaux sans résidus de calcination). Les valeurs énormes sur roches éruptives, vers 6 % de la matière sèche ou 40 % des cendres, incitent à se questionner sur la composition de ces résidus. BAUMEISTER e.a. 1978:15 cite des teneurs générales en Si entre 0.1 à 1.4 % m.s.; sur serpentine MINGUZZI e.a. 1953:29 ont trouvé 5 à 15 % des cendres. Pourtant CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O NH<sub>3</sub> et partiellement S sous forme SO<sub>2</sub> s'échappent en principe à ces hautes températures (BAUMEISTER e.a. 1978:79). Et S et Cl, non analysés ici, ne valent guère environ que .1 % de la matière sèche (LARCHER 1973:150). Voir pertes p. 64.

\*

La calcination sèche, méthode la plus vieille et la plus simple, comparée surtout à la calcination en solution où les plantes sont digérées dans un mélange d'acides concentrés donc à températures basses, a les avantages suivants :

- méthode favorable en particulier pour matériau sec
- relativement facile à exécuter, permet d'analyser beaucoup de prises
- pas de danger d'explosion et d'emploi d'acides trop forts
- contamination minimale en oligo-éléments par réactifs ajoutés
- moins de pertes par formation de composés non solubles, etc.

et les inconvénients suivants :

- peu indiqué pour éléments en très faible quantité
- pertes mécaniques par micro-explosions dans les cendres
- pertes d'éléments volatils, les principaux étant Hg As Cd Zn aux températures >450°C, P >480°C, K >500°C etc. (GRABNER, KOCH)
- contamination par l'air nécessaire à la combustion (d'autant plus longue que la température est maintenue basse), etc.

espèce	no sol	ana	ppm matière sèche									
			Al	Ca	Cr	K	Mg	Mn	Na	Ni	P*	
Carex sempervirens	11	ca	1	1'100.	7'800.	85.	24'000.	16'000.	180.	76.	180.	3800.
			2	2'200.	12'000.	440.	28'000.	24'000.	190.	200.	230.	4100.
Salix breviserrata	19	se	1	1'100.	5'600.	53.	2'000.	6'600.	170.	38.	240.	770.
			2	1'400.	7'200.	140.	2'000.	8'900.	170.	100.	270.	720.
Silene willdenowii	21	se	1	130.	3'500.	5.	3'500.	5'900.	65.	49.	63.	1100.
			2	150.	5'000.	15.	3'600.	6'100.	44.	120.	63.	1000.
Dryas octopetala	53	se	1	810.	13'000.	6.	4'100.	5'000.	930.	43.	15.	540.
			2	1'100.	12'000.	16.	3'800.	5'100.	880.	100.	12.	560.

\* P par dosage colorimétrique, à titre informatif

Fig. 32

Comparaison des analyses des cendres effectuées selon deux méthodes :

1 calcination 20 h à 450°C; extrait 1 g sol/25 ml HCl 8 %

2 calcination 3 h à 540°C; extrait 1 g sol/20 ml HCl 2 %

Comparison of ash analysis carried out according to two methods.

Discussion chez GRABNER 1979, 1975:65-68, 1973; FAO 1979; KOCH e.a. 1974: 183-209; NEHRING 1973:11; TOELG 1972:728,961sq; HUMPHRIES 1956:468sq.

Citons à titre informatif 8 échantillons (déjà pulvérisés) qui ont été analysés une année plus tard, en modifiant légèrement la méthode :  
5 g de matière sèche sont carbonisés individuellement à l'aide d'un brûleur en éventail jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de fumée; puis calcinés 3 h à 540°C; attaqués avec 8 ml de HCl 25 % et dilués à 100 ml.

Les valeurs de cette deuxième méthode sont irrégulièrement bien supérieures (fig. 32) et peut-être susceptibles d'expliquer une partie des erreurs COS (p. 64). Toujours est-il que les résultats de ces analyses sont à prendre avec réserve. Je n'ai pas trouvé de travail sur la serpentine donnant des informations suffisamment complètes pour pouvoir y estimer les erreurs et les comparer avec les miennes.

### 3.7.3 Dosage de N et P

Dosage photocolorimétrique de N et P : microkjeldahl.

50 mg de poudre de plantes sont attaqués à l'aide de 1 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc, puis dilués 4000 fois pour N et 100 fois pour P. Réaction de coloration au molybdate et vanadate d'NH<sub>4</sub>. Dosage photométrique de l'extinction de l'extrait coloré à 630 nm pour N et 405 nm pour P. 3 répétitions. (Voir Kjeldahl des sols p. 51). Selon PULSS 1960.

La comparaison de cette méthode avec la titration à partir de l'extrait au HCl après calcination sèche, effectuée sur 86 échantillons de plantes (issues d'expériences de culture sur serpentine) est assez concluante, l'extrait au HCl livrant des valeurs légèrement supérieures.

### 3.7.4 Calculs de caractéristiques ultérieures

Afin de calculer l'"acidité organique" (p. 194) correspondant à l'excès des cations sur les anions, C-A, on a sommé pour :

Les cations CAT =  $\Sigma(\text{Al}^{3+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{K}^{+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Na}^{+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Zn}^{2+})$  alors qu'on retient souvent seulement  $\Sigma(\text{Ca Mg K Na})$  selon DIJKSHOORN 1969:205 in RORISON 1969 et BAUMEISTER e.a. 1978:70. A Davos Al<sup>3+</sup> et Fe<sup>2+</sup> forment en gros 1/4 des valeurs CAT. (On peut éventuellement objecter qu'on ait retenu Al<sup>3+</sup> au lieu de Al(OH<sub>4</sub>)<sup>-</sup>).

Les anions AN =  $\Sigma(\text{NO}_3^-, \text{H}_2\text{PO}_4^-)$ . Alors qu'on pourrait encore compter Cl<sup>-</sup> et les anions des oxydes de S B Mo Si Al etc. selon BAUMEISTER e.a. 1978:70, 1981:28sq et STRASBURGER 1978:332; DIJKSHOORN o.c retient  $\Sigma(\text{N P Cl S})$ .

Afin d'avoir une idée de C/N on a calculé un <C> approximatif en admettant que la matière organique contienne en moyenne 58 % C (STICHER 1972:79) :

$$\langle C \rangle = (100 - \text{cendres}) / 1.724.$$

Afin d'avoir une idée des pertes au feu et des erreurs d'analyses on a calculé :  
COS = CEN - OXI - <SiO<sub>2</sub>> (en %) où

CEN : cendres

OXI : somme des oxydes des éléments (cationiques et P)

CEO : CEN - OXI

CES : CEN - <SiO<sub>2</sub>>

Alors que OXI est à peu près constante sur tous les substrats, COS vaut 13 % et <SiO<sub>2</sub>> 43 % des cendres pour les plantes des substrats éruptifs; COS vaut 31 % et <SiO<sub>2</sub>> 11 % pour celles des sédimentaires p. 170. Les "pertes" sont donc importantes. La participation des éléments non analysés pourrait comporter 3 % des cendres pour SO<sub>4</sub> et 1 % pour Cl selon les valeurs générales de LARCHER

1973:158; et en moyenne 8.4 % SO<sub>4</sub> et 4.4 % Cl sur serpentine selon MINGUZZI e.a. 1953:292, 13 échantillons. Dans ce dernier travail, où Si Fe Ca Mg K Na P S Cl ont été analysés, COS s'élève à 12 % et SiO<sub>2</sub> à 12 % des cendres.

### 3.7.5 Estimation des oxalates et Ca solubles des feuilles

Test de KINZEL.

Les feuilles adultes d'espèces de serpentine et d'ophicalcite des mêmes stations décrites p. 6, ont été récoltées au mois d'août et analysées le même jour (7.8.1979); coupées fin aux ciseaux en inox, placées dans des éprouvettes et recouvertes de 2 à 3 fois d'eau distillée bouillante et laissées reposer plusieurs heures. L'extrait, filtré si nécessaire, a été additionné pour estimer :

- l'oxalate soluble : d'une solution de Ca-acétate 2N et d'acide acétique 2N  
- le Ca soluble : de quelques gouttes d'une solution saturée de NH<sub>4</sub>-oxalate. Puis on a testé les échantillons quant à une éventuelle précipitation et à l'intensité de celle-ci. Deux répétitions. Selon KINZEL 1963:534.

## 3.8 Traitements mathématiques

### 3.8.1 Tests statistiques

On a renoncé aux tests statistiques car la plupart des données comptait moins de 30 échantillons par séries comparables. On s'est borné à indiquer des moyennes accompagnées de l'écart-type afin de donner une idée de la dispersion des échantillons. Selon la formule considérant un choix d'échantillons (1/n-1) plutôt qu'un ensemble (1/n) :

$$S_x^2 = (1/n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad : \text{écart-type} = \text{standard deviation}$$

### 3.8.2 Analyse des correspondances

Parmi les innombrables procédés mathématiques développés ces dernières années pour exploiter de grandes masses de données, on a recouru à l'analyse factorielle des correspondances (CORDIER 1965, BENZECRI e.a. 1980, HILL 1974) sous la forme du programme d'ordinateur ACOBI (élaboré par LEBART e.a. 1977). WILDI (e.a. 1986) et VETTERLI (1982:20sq) en ont décrit l'emploi pour des données géobotaniques.

L'analyse factorielle des correspondances a surtout été appréciée ici pour illustrer les résultats grâce aux graphiques suggestifs des similitudes qu'elle offre. Elle ordonne simultanément p.ex. d'une part les relevés et d'autre part les espèces de ces relevés, complétées ou remplacées par des données stationnelles, ou encore d'une part les espèces et d'autre part les teneurs chimiques de ces espèces, et fait ressortir les relations entre ces paires de groupes de données. On retient les distributions des variables le long des axes principaux et tente d'interpréter la signification écologique de ces axes.

Dans le but d'affiner les résultats on a refait plusieurs fois la même analyse en supprimant les relevés y dénotant des valeurs excentriques sur un des trois premiers axes de la représentation pluridimensionnelle des similitudes.

Remarques.

Pour déchiffrer les graphiques des similitudes, il faut considérer que :

- les points proches correspondent à des caractéristiques semblables, les éloignés à des dissemblables;
- les variables sont projetées parmi les relevés (espèces) où leur valeur est élevée;
- les points projetés en périphérie accusent une différenciation plus claire, p.ex. si les caractéristiques de sol sont projetées en périphérie (fig. 36-1 à 5 p. 75sq), c'est qu'elles changent plus par rapport aux relevés que les relevés par rapport aux caractéristiques de sol;
- les données s'ordonnent typiquement en croissant de lune.

Pour l'interprétation écologique des analyses il faut considérer que :

- l'interprétation repose sur l'hypothèse qu'un gradient le long d'un facteur écologique ressort visiblement, voir distribution en croissant de lune ci-dessus (et en simplifiant beaucoup, qu'aux axes des distributions on peut faire correspondre des facteurs écologiques simples);
- le pouvoir explicatif d'un axe est exprimé par la valeur propre de cet axe en %;
- la participation d'une variable à l'explication des similitudes/différences entre les échantillons est exprimée par la contribution absolue en % de cette variable à chaque axe, la somme pour un axe = 100 %;
- la répartition d'une variable sur les différents axes est exprimée par sa contribution relative, la somme pour une variable = 100 %.

Données stationnelles p. 71 et 149

Les données pédochimiques et stationnelles n'ont pas été pondérées parce qu'on ne disposait pas de critères de pondération justifiables et qu'on voulait éviter une manipulation arbitraire des données (voir ci-dessous). Les variables revêtent ainsi quasi autant de valeurs qu'il y a de données (contrairement aux données floristiques réparties en 8 classes). Elles varient grandement, en absolu entre .007 et 2650. (en partie différentes unités), leurs "amplitudes" (valeur maximale/valeur minimale) entre 1.2 et 470. (fig. 35 p. 74). Or l'ordination des variables du sol reflète assez bien leurs amplitudes : les caractéristiques à grande amplitude tendent à être projetées du côté des relevés à substrat et végétation développée, ce que l'on peut interpréter écologiquement (p. 72).

Afin de simplifier les comparaisons entre graphiques, la direction des axes a en partie été inversée, en les orientant (arbitrairement) d'après les distributions des relevés dans les graphiques floristiques, à savoir :

axe 1 : à gauche : peu développé → à droite : développé

axe 2 : en haut : P → en bas : Mg.

En effet, on a choisi d'orienter l'axe 2 selon P et non p.ex. selon C/N qui aurait amené une autre orientation pour quelques graphiques. Cela exprime bien les significations écologiques moins univoques de l'axe 2, contrairement à la signification claire de l'axe 1, dans toutes les analyses factorielles des correspondances de ce travail, d'ailleurs.

Lors de la comparaison et de la combinaison des données stationnelles et floristiques il faut garder à l'esprit la différence du type d'information que livrent ces deux groupes de données. Ainsi les données des sols en particulier sont l'objet de beaucoup plus d'interférences dues aux seules méthodes d'analyse (à quoi s'ajoutent les difficultés d'interprétation des résultats de ces analyses p. 47) que ne le sont les relevés phytosociologiques.

Cependant les relations entre les ordinations stationnelles et floristiques sont étonnamment étroites, comme l'illustrent les analyses stationnelles et floristiques simples et combinées (fig. 61 p. 148 et 149).

Données floristiques p. 133, 146 et 148

L'analyse des correspondances a été effectuée sur les relevés purement floristiques en pondérant les abondances en 8 classes de présence comme suit :

absence → 0	+ → 4	2 → 6	4 → 8
. → 3	1 → 5	3 → 7	5 → 8

Cette transformation des indices d'abondance-dominance équivaut à une certaine manipulation des données de départ. L'estimation de cette pondération reste largement empirique (cf VETTERLI 1982:21). Comme les indices + et . sont les plus fréquents, cela s'approche d'une simple pondération présence/absence (transformation encore plus extrême) qui, d'après ROUX e.a. 1976 et GUINOCHE 1973:18, livre de meilleurs résultats.

L'analyse des correspondances s'est surtout avérée utile pour dégager la structure de la végétation. Les résultats de cette ordination corroborent les tendances dégagées empiriquement. Le nombre très variable d'espèces par relevé sur serpentine (2 à 47) suggère néanmoins quelque réserve à l'égard de l'interprétation des résultats.

Données phytochimiques p. 172

Afin de ne pas trop réduire les matrices de données phytochimiques, les rares valeurs manquantes ou excentriques ont été remplacées par la moyenne de l'élément pour le substrat concerné (soit 11 valeurs isolées de Cu Fe Mo Si et 11 valeurs de P sur les 1728 valeurs). Les analyses des correspondances ont été effectuées d'une part sur les valeurs exprimées en % de la matière sèche et % des cendres des plantes, ainsi qu'en diverses unités, ppm et mmoles, dont les différences sont discutées p. 174; et d'autre part sur les valeurs pondérées, rapportées à 100 et à l'amplitude, livrant de moins bons résultats que les données non manipulées.

Rapporté à "100 %". Comme les valeurs brutes varient entre .125 ppm (Mo) et 169'000 ppm (Si), p. 170 et les valeurs ci-dites calculées, à savoir à partir des valeurs brutes ou primaires, varient entre .0562 (Ca/Mg) et 37.6 (CEO), on a rapporté les données à la valeur maximale de la variable correspondante, posée comme valant 100 %. L'image des projections distingue un peu mieux les substrats. Par ailleurs le choix des éléments chimiques contribuant le plus fortement aux axes se modifie légèrement, Cr, Mo, Ni et Mn en particulier y apparaissent en meilleure place (fig. 72-1 et 5 p. 172).

"1/amplitude". Comme les amplitudes de variation (valeur maximale/valeur minimale p. 175) des valeurs brutes varient entre 4.07 (N) et 760. (Cr), on a divisé les données par l'amplitude de variation de la variable correspondante. Le pouvoir explicatif de l'axe 1 diminue (données en ppm m.s.) au profit de celui de l'axe 2 qui augmente. Cela a pour effet de faire ressortir Fe déjà fortement sur l'axe 1, la distribution des autres éléments restant quasi semblable (fig. 72-1 et 6 p. 172).