

Zeitschrift: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidg. Tech. Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich
Herausgeber: Geobotanisches Institut, Stiftung Rübel (Zürich)
Band: 117 (1994)

Artikel: Végétation et stations alpines sur serpentine près de Davos
Autor: Egger, Brigitte
Kapitel: 4: Résultats : sols sur serpentine
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308981>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

4 RESULTATS : SOLS SUR SERPENTINE

La description des sols de serpentine alpine à Davos, serpentine au sens strict défini p. 132, vise principalement à cerner les éléments géochimiques disponibles aux plantes, leurs relations entre eux et leur amplitude de variation liée à l'établissement de la végétation. (L'étude des sols étant conçue comme subsidiaire à celle de la végétation, les résultats par rapport à celle-ci sont traités au chapitre 5, alors que les éléments effectivement trouvés dans les plantes font l'objet du chapitre 6). On a analysé (légende pédochimique annexe 1) :

- pour situer le degré de développement des sols en réponse à la végétation :
pH C N NH_4^+ NO_3^- P. C N, absents de la roche, proviennent de la colonisation végétale;
- pour donner une idée des réserves disponibles aux plantes (limites supérieures), les propriétés d'échange : T Ca^{2+} Mg^{2+} K^+ Na^+ ; les valeurs calculées Mg/Ca , V etc.; Ni^{2+} Cr^{3+} Al^{3+} . Ca et K, nécessaires aux végétaux, sont rares dans la roche, Mg Ni Cr défavorables sont abondants;
- pour quelques échantillons les valeurs totales : S Ni Cr Cu Zn;
- pour situer sommairement la pédogénèse, l'altération et les qualités physiques de ces sols peu évolués : les profils des sols et la granulométrie.

Le choix des méthodes (p. 38 à 56) s'est orienté à la possibilité de comparer la serpentine de Davos avec d'autres substrats et d'autres serpentines. La discussion des résultats se concentre principalement sur les données de l'horizon supérieur A1 (0-5 cm) qui à elles seules livrent déjà une bonne idée du développement du sol et différencient bien les sols les uns des autres (p. 94).

4.1 Teneurs chimiques des sols

4.1.1 Teneurs pédochimiques moyennes

Les moyennes des teneurs pédochimiques selon les 15 sous-unités de végétation sur serpentine sont illustrées p. 140; teneurs que la fig. 33 résume en 2 grands groupes : se1, selon les unités I-IV considérées comme peu développées; se2 unités V-VII développées; avec indications des seuils entre se1 et se2 p. 153.

En résumé, des se1 sols bruts/peu développés en direction des se2 développés :

- C N P Ca Mg K S T H Ni NO_3^- F' rec alt hau augmentent;
- pH C/N Ca/K Mg/Ca V diminuent. (Légende annexe 1).

On assiste ainsi le long du développement du sol, largement lié à celui de la végétation (p. 161sq), à une accumulation et meilleure disponibilité des éléments nécessaires aux végétaux (fig. 26, p. 48) et caractéristiquement absents ou rares dans la roche serpentine, à une amélioration des rapports des éléments entre eux, en même temps qu'à une certaine acidification et désaturation du complexe absorbant. Ces tendances de développement se retrouvent quasi telles quelles de bas en haut des profils de sol (p. 103 sq).

Comparaison faite de types de colonisation équivalents (éboulis; gazons, etc. en altitude et exposition comparables), les sols sur serpentine ont une constellation de caractéristiques bien distincte de celle sur silicates et sur carbonates de la région (données relevées simultanément, non publiées). En gros (se=serpentine; si=silicates; ca=carbonates) :

se = si = ca	: C N P	semblable à si, ca
se > si, ca	: Ni^{2+} Mg/Ca	supérieur à si, ca
si = ca > se	: (Na^+)	inférieur à si, ca
si > se > ca	: NH_4^+ H Al^{3+}	intermédiaire entre si et ca
ca > se > si	: pH _A pH _C NO_3^- S V	"
si = se < ca	: Nm Ca^{2+} F'	semblable à si
ca = se > si	: Mg^{2+}	semblable à ca
ca = se < si	: C/N K^+ T	"

Du point de vue des caractéristiques biologiquement défavorables, d'après les variables analysées ici, les sols sur serpentine se singularisent ainsi par des valeurs échangeables de Ni^{2+} et Mg/Ca inhabituellement élevées; des valeurs de Ca aussi maigres que sur silicates, de K aussi maigres que sur carbonates, de Mg aussi élevées que sur carbonates; les autres valeurs étant soit intermédiaires entre silicates et carbonates, soit aussi favorables que sur l'un de ces deux substrats (voir particularités touchant Fe Cr Co Mo ressortant dans les cendres de plantes fig. 70 p. 170). L'estimation de la disponibilité dans les sols de ces principaux éléments semble largement confirmée par les teneurs relatives trouvées dans les cendres des plantes.

*

CHIMIE DES SOLS DE SERPENTINE ALPINE DE DAVOS : moyennes \pm écarts-types									
variables pédochimiques		se1 stations peu développées végétation : unités I-IV lithosols à ranker (brunif.)				se2 stations développées végétation : unités V-VII ranker brunifiés			
unités de mesure		\bar{m}	\pm	Sx	(nb)	\bar{m}	\pm	Sx	(nb)
	pHA	7.00	\pm	.37	(38)	6.12	\pm	.39	(18)
	pHC	6.54	\pm	.43	(38)	5.69	\pm	.46	(18)
$\%$	C	1.05	\pm	1.06	(27)	7.83	\pm	2.95	(16)
	N	.0750	\pm	.0674	(23)	.584	\pm	.248	(17)
	C/N	17.6	\pm	8.58	(23)	13.7	\pm	2.0	(16)
ppm (1977L)	NH ₄ ⁺	6.00	\pm	1.60	(8)	7.9	\pm	36.5	(15)
(1977L)	NO ₃ ⁻	28.3	\pm	21.7	(8)	94.0	\pm	61.4	(15)
	P tot	615.			(25)	1250.			(18)
	P ass	2.03	\pm	2.49	(27)	4.60	\pm	3.67	(18)
(mval/mval)	Mg/Ca	3.59	\pm	1.55	(27)	2.34	\pm	.77	(18)
mval/100g sol	Ca 2+	1.97	\pm	1.55	(27)	6.18	\pm	3.27	(18)
	Mg 2+	5.80	\pm	2.75	(27)	12.7	\pm	4.82	(18)
	K +	.0777	\pm	.0535	(26)	.504	\pm	.265	(16)
	Na +	.0304	\pm	.0129	(26)	.0365	\pm	.0172	(18)
	Al 3+	1.96	\pm	.218	(11)	2.00	\pm	.00	(3)
	Ni 2+	.0395	\pm	.0147	(11)	.0794	\pm	.0130	(2)
	S	7.87	\pm	3.70	(26)	20.2	\pm	7.9	(16)
	T=CEC	15.7	\pm	6.88	(26)	52.3	\pm	18.9	(18)
$\%$	H	7.39	\pm	3.98	(25)	34.0	\pm	12.7	(16)
	V	53.5	\pm	12.6	(25)	37.3	\pm	6.1	(16)
	F'	16.7	\pm	7.5	(14)	39.0	\pm	9.5	(15)
m	hau	2490.	\pm	113.	(38)	2310.	\pm	67.	(18)
$\%$	rec	7.26	\pm	7.30	(38)	59.7	\pm	24.6	(18)
	alt	2.11	\pm	1.43	(38)	3.39	\pm	.67	(18)

Fig. 33

Valeurs pédochimiques sur serpentine résumées en deux grands groupes selon le degré de développement des stations : \bar{m} moyenne, Sx écart-type, nb nombre d'échantillons (légende pédochimique annexe 1; données brutes annexe 2).

Pedochemical values on serpentine summed up in two large groups according to the degree of habitat development : \bar{m} mean, Sx standard deviation, nb number of samples (pedochemical legend annex 1; data annex 2).

En ce qui concerne T C N P K, les conditions pédochimiques de départ de la colonisation sur serpentine ne sont guère plus extrêmes que p.ex. sur carbonates à Weissfluh 2800 m (ainsi la capacité d'échange T minimale trouvée dans des sols bruts en surface comporte 8 mval/100g sol sur serpentine, 12 sur carbonates et 16 sur silicates).

Si les T sont élevées sur serpentine et se comportent comme dans les sols sur carbonates, les saturations V par contre indiquent une plus forte désaturation, peut-être à cause du Mg lixivié plus facilement. Pour situer ces valeurs disons que la capacité d'échange T du minéral serpentine chrysotile vaut 0-5 mval/100g, celle de l'augite 12, celle de l'horizon A1 des sols bruns, qu'ils soient eutrophe ou acide, 10 à 20, et celle de l'humus environ 300 mval/100g (p. 109 et p. 114; DUCHAUFOR e.a. 1977:297; 1979:340). Il semble vraisemblable que les T des se1, de 16 mval, soient surtout déterminées par les minéraux; et celles de se2, de 52 mval, surtout par la matière organique. Rappelons que T des litières augmente au fur et à mesure de la décomposition de ces dernières, jusqu'à être assez élevée pour les mull (a.c. 1879:38), qui est la forme d'humus des sols les plus développés sur serpentine à Davos (p. 86). Bref, les T sur serpentine alpine sont élevées non seulement si on les compare à celles des sols bruns, mais également par rapport à la plupart des serpentines des étages inférieurs et d'autres régions tempérées où, pour des pH autour de 6 et 7, les T valent le plus fréquemment entre 5 et 30 mval/100g sol, et plus rarement jusqu'à 60 à pH plus bas. Quant aux saturations V elles valent 54 % pour se1 et 37 % pour se2. Elles correspondent ainsi à celles des sols bruns mésotrophes (p. 95), sans jamais atteindre les désaturations des sols podzoliques où V est <20 % (a.c. 1960:76). Ces valeurs sont plutôt inférieures à celles d'autres serpentines, où les V les plus fréquents sont 70 %. T et V d'autres serpentines chez BERRE e.a. 1974:138; BIRSE 1982:144; CAFLISCH 1974:tab.3; KRUCKEBERG 1969:97sq; STICHER e.a. 1986:282; VERGER 1979:134; WILSON 1978:184; (T et V discutés ultérieurement p. 72). Le pH est discuté p. 103 (et p. 40 et 79).

Considérons le rapport C:N:P en s'orientant à la matière organique où il vaut approximativement 100:10:1 (DUCHAUFOR e.a. 1979:395) ou plus précisément 100:4:.25 en moyenne selon les plantes de Davos analysées (p. 170). Dans la roche serpentine C et N sont absents et P de l'ordre de .05 % P₂₀₅, soit 220 ppm P (selon PETERS 1963:628), ce qui correspond d'ailleurs à la teneur moyenne de la croûte terrestre (DUCHAUFOR e.a. 1979:395); la moyenne des ultramafites se situant vers 220 ppm P, celle des granites vers 760 et celle des carbonates vers 400 (GREEN 1972 ex BROOKS 1987:16). Une analyse de P_{tot} (extrait à 70 % HClO₄, données non publiées) de la poudre de roche livre 330 ppm P dans la serpentine de Totalp, 850 dans la silice et 400 dans la dolomie. Ces différences entre les roches s'atténuent entre les sols d'autant plus qu'il y a accumulation d'humus. Dans les sols de serpentine le rapport C:N:P à partir des valeurs totales vaut 100:7.2:5.9 pour se1 et 100:7.5:1.6 pour se2, avec des moyennes de 615 ppm P pour se1 et 1250 pour se2, le P le plus bas valant 290 ppm, ce qui correspond sans doute à la teneur de la roche même. Ces valeurs s'accordent bien avec celles de SLINGSBY e.a. 1977:606 pour différentes serpentines d'Angleterre, déterminées par spectroscopie XRF, avec celles rassemblées par BROOKS 1987:25,36 et celles de SASSE 1979:383 d'Europe centrale. On remarquera donc qu'au niveau des teneurs totales, C et N s'accumulent relativement à P le long du développement, le rapport C:N:P des sols évoluant en direction des teneurs de la matière organique. De ce point de vue-ci, P n'apparaît guère comme un élément limitant (cf p. 79). Notons que les valeurs de P assimilable (extrait au bicarbonate de Na) de Davos sont environ 10 fois plus basses que celles de SLINGSBY entre 12 et 170 ppm pour 10 % de matière organique, bien que les teneurs totales de ces mêmes sols soient semblables.

Les réserves en K total par contre (extrait à 70 % HClO₄) semblent s'avérer très maigres sur serpentine : ainsi trois sols comparables sous gazon de Davos livrent 1'200 ppm K sur serpentine contre 12'000 ppm sur silicates et 7'500 sur dolomie, à comparer aux 6'600 ppm de la roche augite de Davos selon PETERS 1963:624,625; aux 830 à 2'500 ppm des ultramafites selon BROOKS 1987:14; aux 2'000 à 20'000 sur serpentine selon SLINGSBY e.a. 1977:606; et enfin à la moyenne de 16'000 ppm K de la lithosphère (DUCHAUFOR e.a. 1979:379). La grande

différence entre roche et sol de Davos suggère une lixiviation élevée de K, connu pour être un élément très mobile dans certaines conditions. C/N est discuté p. 86 (et p. 78 et 79); N minéralisé p. 83 (et p. 78).

Les teneurs échangeables moyennes en Ca entre 2.0 et 6.2 mval/100g sol, en Mg entre 5.8 et 13., en K entre .08 et .50 ainsi que les Ca/Mg entre .28 et .43 des sols de serpentine de Davos s'inscrivent bien parmi celles des autres serpentines des plus diverses régions, discutées en détails pour Ca et Mg par PROCTOR e.a. 1975:314-336 et BROOKS 1987:44-52 : ils citent des valeurs pour Ca entre .2 et 4. mval et dans quelques cas jusqu'à 15. mval, en accord avec la richesse variable de cet élément dans la roche, si ce n'est à la suite de la remontée biologique (p. 103). Ainsi la roche serpentine augite répandue à Davos contient 4 à 10 fois plus de Ca que la serpentine vraie, ce qui se reflète dans les teneurs échangeables plutôt élevées. Quant aux teneurs usuelles des serpentines en Mg, elles gisent entre 3 à 30 mval, le Ca/Mg calculé à partir des mval restant généralement inférieur à 0.4. Alors que les teneurs usuelles en K des serpentines des plus diverses régions gisent entre .05 à .60 mval/100g sol, soit près de 10 fois moins que celles en Ca; valeurs de K échangeable sur serpentine chez BERRE e.a. 1974:138; BIRSE 1982:144; CAFLISCH 1974:tab. 3; DUVIGNEAUD 1966:284; ERNST 1974b:10; KRAPPENBAUER 1967:214; SASSE 1979:382; VERGER 1979:134, 1982:61; VERGNANO 1953:121; WALKER 1954:262; WILSON e.a. 1978:184. Ca:Mg:K sont discutés p. 80 (et p. 78 et 183). Ni, Cr, Al, S sont discutés p. 80 (et Ni p. 73).

*

Si l'on admet que l'essentiel des aspects pédochimiques est abordé dans ces analyses, on peut conclure que la constellation singulière de ces caractéristiques sur serpentine (alpine, à Davos) suffit pour causer un tel freinage de la biosynthèse, une telle sélection des espèces susceptibles de s'y épanouir, jusqu'à singulariser la végétation sur serpentine de celle des silicates et des carbonates voisins. Bien sûr, les seules teneurs des sols ne disent pas tout. Ainsi les teneurs par surface, retenant l'épaisseur des horizons du sol, ainsi que le dynamisme dans les cycles biogéochimiques, permettraient de se faire une idée plus précise sur les différences entre les substrats, différences qui pourraient alors éventuellement se révéler plus extrêmes.

4.1.2 Similitudes entre teneurs pédochimiques

Les similitudes entre variables estimées pour décrire les sols et stations de serpentine ont été calculées à l'aide d'une analyse des correspondances : graphique des similitudes fig. 36-1 à 9 p. 75sq (méthodes p. 65; similitudes floristiques et pédochimiques combinées p. 149). N'ont été retenues ici que les projections instructives selon les axes 1 et 2. Afin de simplifier les comparaisons visuelles, la direction des axes a en partie été inversée. Par ailleurs, pour offrir une idée des liens entre les divers horizons d'un sol, les projections du profil le plus profond d'un sol bien développé, un ranker alpin brunifié, ont été reliées par une fine ligne traitillée (sol 133, profil 8 p. 101). Ces figures sont surtout censées illustrer des relations. Elles ne dégagent pas nécessairement des causalités pas plus qu'elles ne prétendent retenir toutes les composantes significatives.

L'introduction différenciée des diverses variables, dans plus de 30 analyses factorielles des correspondances, a permis de préciser leur comportement réciproque. Variables considérées (légende annexe 1) :

- caractéristiques chim. primaires : pH_A pH_C C N NH₄ NO₃ P T Ca Mg K Na Ni Al
- caractéristiques chimiques calculées : C/N Mg/Ca S V H dpH
- horizons des profils p
- données stationnelles : F' alt hau rec nbe
- valeurs indicatrices stationnelles et formes biologiques des espèces.

*

Pouvoir explicatif des axes. Dans l'analyse des correspondances des variables pédochimiques, le pouvoir explicatif de l'axe 1 excède généralement de beaucoup celui de l'axe 2 et des suivants (fig. 34, premières colonnes). Or presque toutes les variables participent fortement à l'axe 1, sur la base des contributions relatives, (respectivement aussi à l'axe 2 dans les analyses comprenant NH_4^+ NO_3^-) d'autant que l'on retient plus de variables simultanément. Bref, cela traduit des corrélations assez grandes entre ces variables. Dû au type d'analyse, les données pédochimiques et stationnelles sont ordonnées en une structure principale, ici presque linéaire, et qu'on peut interpréter écologiquement.

Interprétation écologique des axes

Les projections des relevés sur les fig. 36-1 à 9 s'avèrent ordonnées le long du développement du substrat, lié à celui de la végétation (p. 149). Quant au profil du ranker brunifié d'une station développée, il s'inscrit remarquablement bien, à l'envers, le long de ce gradient de développement (et p. 103).

Les types de variables tendent à participer différemment à l'explication des similitudes entre échantillons (sur la base de leurs contributions absolues, fig. 34) en ordre d'importance :

- les variables stationnelles (recouvrement végétal en tête, et granulométrie) tendent à l'emporter sur les valeurs pédochimiques
- les variables pédochimiques calculées à partir des primaires (V puis H en tête) à leur tour sur les variables pédochimiques primaires
- les variables pédochimiques primaires les plus significatives étant NO_3^- T C pH.

Cela atteste aux variables stationnelles une excellente capacité explicative, suivies par les variables pédochimiques calculées. La position de ces dernières parle pour la signification écologique accordée aux variables calculées telles V C/N Mg/Ca et même H acidité théorique, variables que l'on peut considérer comme intégrant plusieurs facteurs écologiques. Le fait remarquable reste que pour tous les types de variables les projections des relevés s'avèrent ordonnées le long du développement du substrat, lié à celui de la végétation.

L'axe 1 est différencié (sur la base des contributions absolues) le plus clairement par les variables :

- V Mg/Ca pH (qu'accompagnent NH_4^+ C/N hau dpH Na) projetés parmi les relevés de sols peu développés, à l'un des extrêmes de l'axe (où leurs valeurs sont élevées, p. 95)
- NO_3^- H T C rec (qu'accompagnent N K Ca S) projetés parmi les relevés de sols développés, à l'autre extrême de l'axe.

Cela explicite l'axe 1 comme différenciant le développement du substrat.

L'axe 2 et suivants peu différenciés. Y contribuent :

- NO_3^- P F' (sol fin) vers les relevés plus humides (et plutôt plus développés)
- Mg C/N V vers les relevés plus secs (et plutôt moins développés)
- (Ni opposé à Mg et P : difficile à interpréter).

On peut attribuer à l'axe 2 une différenciation selon l'humidité (qui n'a pas fait l'objet de mesures directes), dans une certaine mesure aussi liée au développement.

*

Il se trouve que l'ordination des variables du sol va assez de pair avec l'amplitude de variation de ces variables (fig. 35; parallèle avec les cendres cf p. 175). En effet, les données de sol n'ont pas été pondérées, qui plus est, les mesures et unités de mesure sont de plusieurs types comme pour les cendres. Elles diffèrent de plus des données floristiques en ce que ces dernières sont réparties en 8 classes de présence (p. 66). Cela n'enlève néanmoins rien à la correspondance remarquable entre ordinations des relevés selon les données pédochimiques/stationnelles et selon les données floristiques (p. 148 et 149).

graphique	1	2	3	4	5
variables	primaires	calculées	primaires calculées	stationnelles	primaires calculées stationnelles
nb varia. nb échan.	9 52 (+profils)	6 52 (+profils)	15 52 (+profils)	5 27	18 27
	axes variabl. 1) 2)	Σ			
axes 1	63 63 - + 5) pH C 4) 65 21 3)	73 73 - - + + H S V C/N 57 15 15 11	74 74 - + + - V T H C/N 25 18 17 15	91 91 + + rec F' 77 13	87 87 + + + rec T H 36 18 12
[contrib. absolues aux axes en %] 2	19 82 + - P Mg 80 13	16 89 + - C/N V 68 25	10 84 + - C/N V 65 21	5 96 - - + F' nbe rec 36 35 21	5 92 + - + - V F' rec H 40 13 12 11
3	8 90 + Ca 86	6 96 + - - S M/C H 42 37 17	6 90 + - + - M/C Ca H S 21 20 19 16	4 99 + - nbe F' 52 47	3 95 + - - rec nbe P 39 23 10

graphique	6	7	8	9
variables pédochimiques autres	primaires calculées	primaires calculées val.indic.espèces formes biol.	primaires calculées	primaires calculées stationnelles NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻
nb de variables nb d'échantillons	Ni 10 27	35 33	NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻ 18 23	20 22
	axes variables Σ			
axes 1	64 64 + - + pH T M/C 45 28 14	73 73 - + + - V T H C/N 23 20 17 10	52 52 - + + NO ₃ C/N V 53 18 15	61 61 + + NO ₃ rec 50 18
[contributions absolues aux axes en %] 2	15 79 + - Ni T 69 17	10 82 + - V C/N 33 33	24 76 + - + T NO ₃ H 23 18 15	22 83 + - NO ₃ rec 43 33
3	9 89 - + - + P pH M/C C 52 13 11 11	6 89 + C/N 44	13 89 + (NH ₄) 88	10 93 + (NH ₄) 94

Fig. 34

Contributions des variables pédochimiques sur serpentine dans les analyses des correspondances des fig. 36 : contributions absolues $\geq 10\%$ (légende annexe 1 et analyse floristique-pédochimique combinée fig. 62 p. 151).

- 1) pouvoir explicatif (de la distribution des points) des 3 premiers axes en % (ou pourcentage des valeurs propres)
- 2) pourcentage cumulé de 1)
- 3) contributions absolues des variables à chaque axe, somme pour un axe = 100 %, mesure de la participation de ces variables à l'explication des similitudes/différences entre les échantillons (par opposition aux contributions relatives de chaque variable aux différents axes, où la somme pour une variable = 100 %)
- 4) variables pédochimiques et stationnelles
- 5) comportement des variables les unes par rapport aux autres : les variables de signe opposé se comportent inversement et sont projetées aux côtés opposés de cet axe; de même signe du même côté.

Contributions of the pedomchemical variables on serpentine in the correspondence analysis of fig. 36 : absolute contributions $\geq 10\%$ (legend annex 1 and floristic-pedomchemical analysis fig. 62 p. 151).

Ainsi les éléments à grande amplitude de variation sur l'ensemble des valeurs sont projetés (là où ils accusent une valeur élevée, selon le principe de cette analyse) parmi les représentants de la végétation développée. En d'autres termes cela signifie que le long du développement, C N K et partiellement Ca "s'accumulent" dans le premier horizon des sols; que la capacité d'échange s'accroît; que le sol s'acidifie (H+) etc.; parallèlement à l'accroissement du recouvrement et du nombre d'espèces.

variables primaires				v. calculées	variables stationnelles		
P	470.	Ca	20.	dpH	∞	rec	recouvrement 95.
N	240.	Mg	13.	H+	55.	nbe	nb d'espèces 15.
C	190.	Na	7.4	Mg/Ca	11.	F'	granulosité 7.4
NO3-	110.	Ni	7.2	S	11.	alt	altération 4.
K	91.	Al	1.4	C/N	9.9	hau	altitude 1.2
NH4+	55.	pHA	1.4	V	3.1	v	valeurs indicatrices <2.7
T	32.	pHC	1.4			w	formes biologiques <100.
classes de présence des espèces, similitudes floristiques p. 57, 133 2.7							

	toutes les variables	v. pédochim. primaires	v. pédochim. calculées	variables stationn.
valeurs maximales	2650. alt	220. NO3	83. V	2650. alt
valeurs minimales	.007 rec	.007 N	.68 Ca/Mg	1. rec
amplitude maximale	470. P	470. P	55. H+	100. w
amplitude minimale	1.2 hau	1.4 Al,pH	3.1 V	1.2 hau

Fig. 35

Amplitude de variation (valeur maximale/valeur minimale) des variables sur serpentine retenues dans les analyses des fig. 36-1 à 9. (Légende annexe 1).

Amplitude of variation (maximal value/minimal value) in the variables on serpentine retained in the analysis of fig. 36-1 to 9. (Legend annex 1).

Fig. 36-1 à 9 (pages 75 à 77)

Graphique des similitudes pédochimiques de l'analyse factorielle des correspondances entre échantillons de sols de serpentine (lecture des graphiques p. 66) :
0 à 7 : projections des relevés caractérisés par l'unité de végétation à laquelle ils ont été assignés dans le tableau général fig. 53 et 54 p. 128sq; relevés o non retenus dans celui-ci. (En chiffres arabes pour des raisons graphiques).

p : projections des horizons inférieurs des profils. Les horizons d'un ranker alpin brunifié (profil 8 p. 101) sont reliés en pointillé.

C à T : projections des caractéristiques des sols, éléments chimiques analysés, données stationnelles, etc. (légende annexe 1).

vf à wu : projections des valeurs indicatrices et formes biologiques des espèces (légende annexe 1).

Graphs of the pedomchemical similarities among soil samples from serpentine (graph lecture p. 66) :

0 to 7 : projections of the relevés marked by the vegetation units they were assigned to in the general table fig. 53 and 54 p. 128sq; relevés o not retained in the table. (In arabic ciphers for graphic reasons).

p : projections of inferior horizons of profiles. The horizons of a brunified alpine ranker (profile 8 p. 101) are bound by a dotted line.

C to T : projections of the soil characteristics, analyzed chemical elements, habitat data, etc. (legend annex 1).

vf to wu : proj. of indicator values and biol. forms of the species (annex 1).

Fig. 36-1
variables :
primaires
(avec
profils)

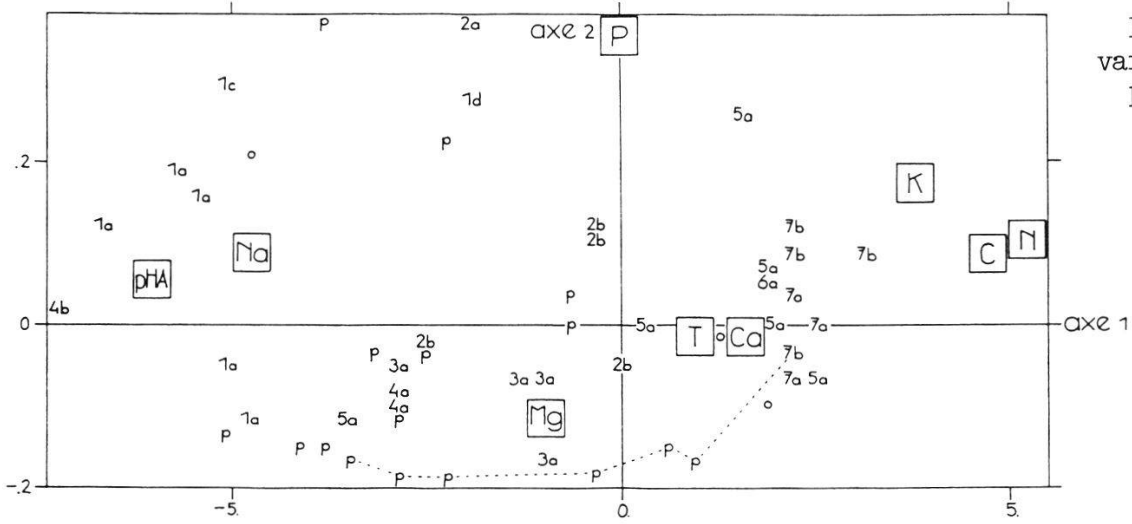


Fig. 36-2
variables :
calculées
(avec
profils)

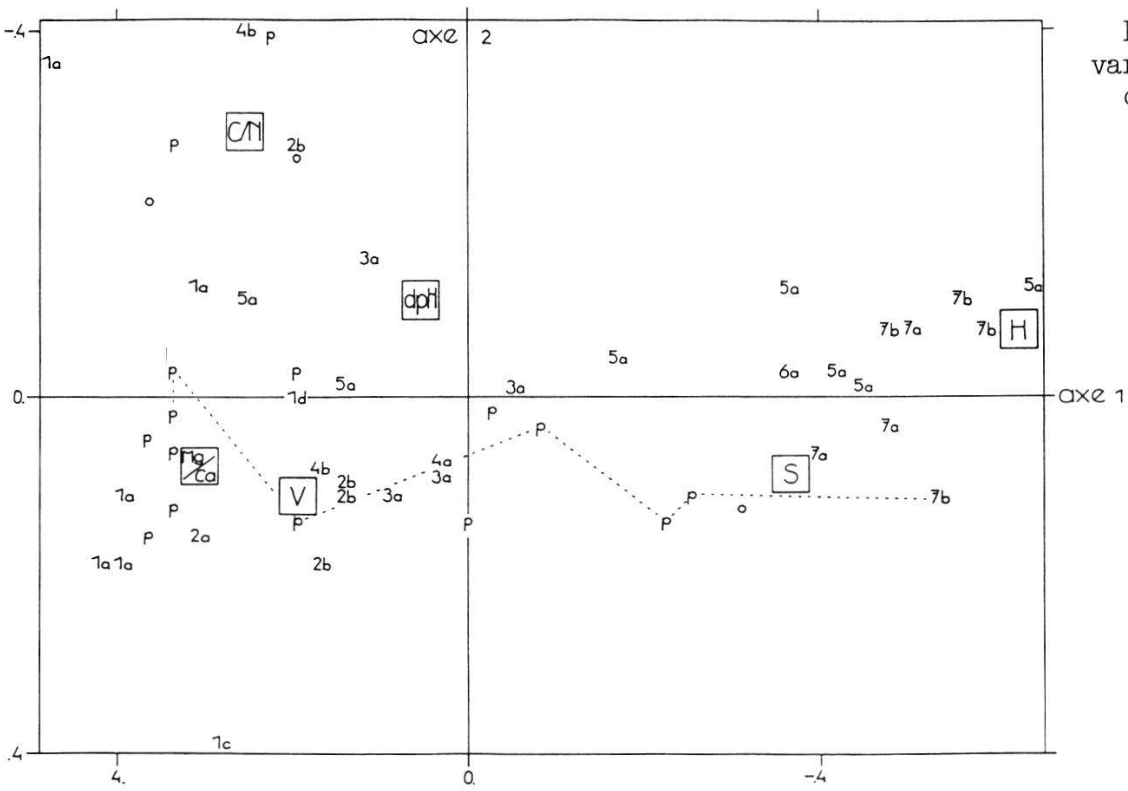
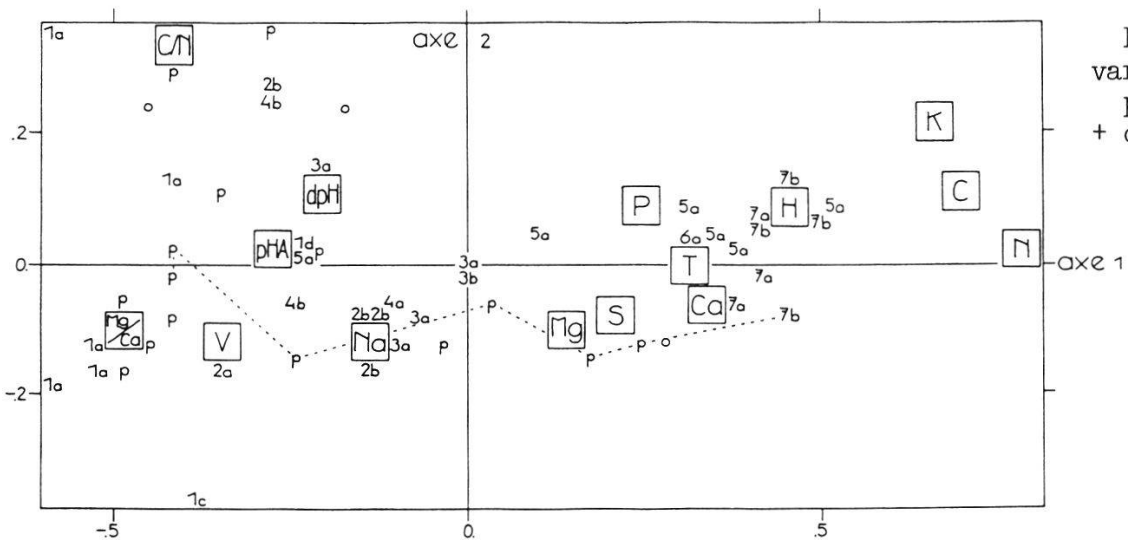
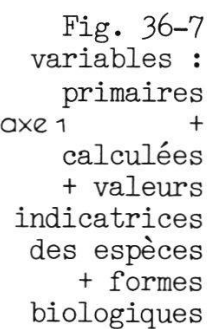
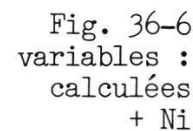
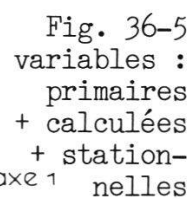
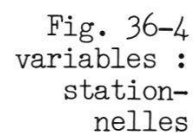
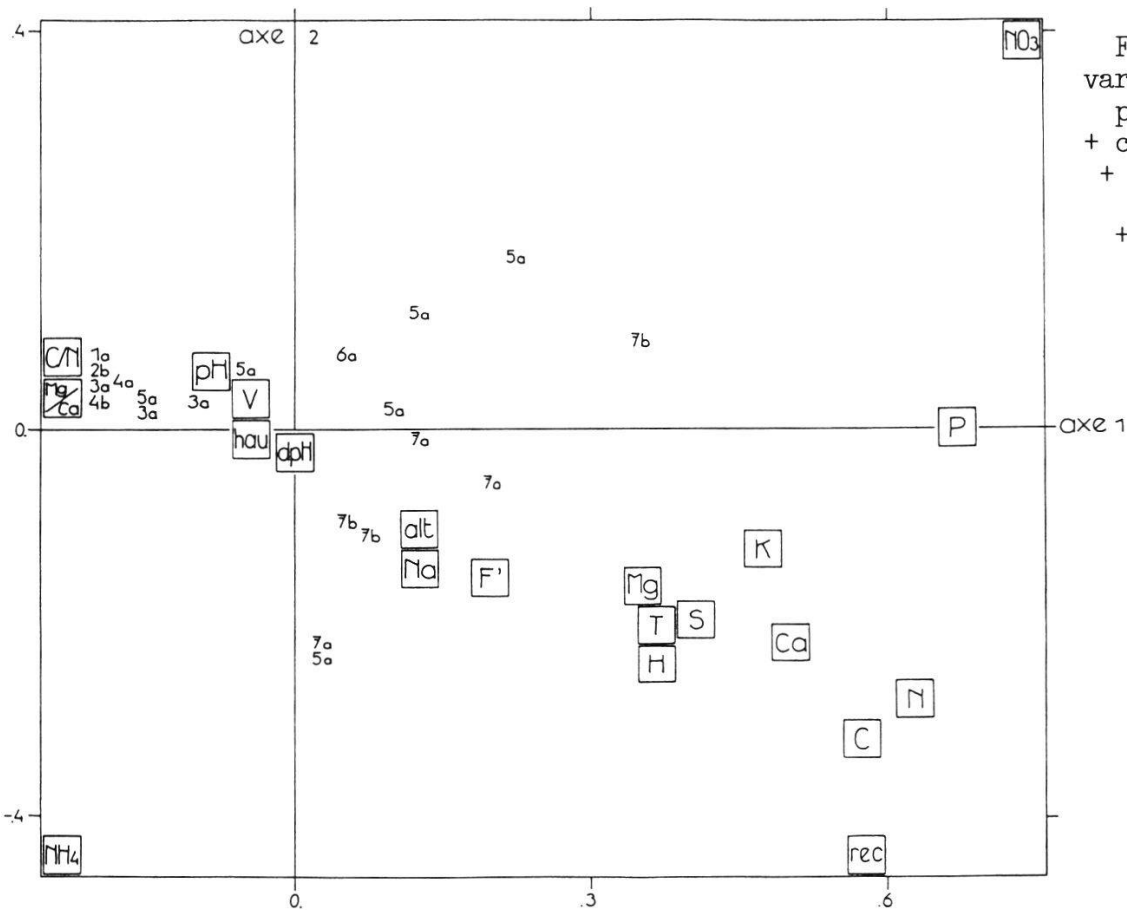
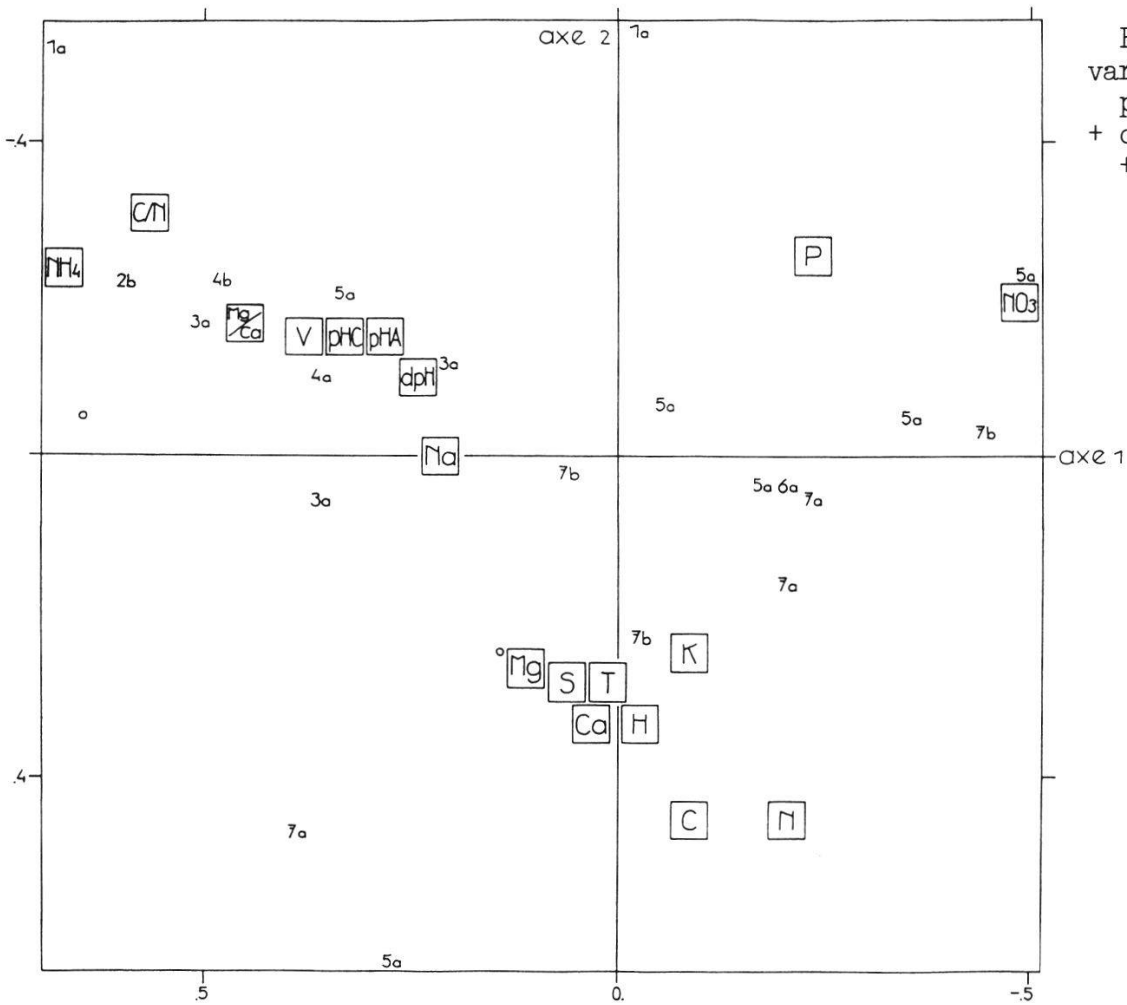


Fig. 36-3
variables :
primaires
+ calculées
(avec
profils)







Comportement de variables singulières

C N P K. Les éléments qui expliquent le mieux les différences entre les stations sont surtout les éléments étrangers ou en faible quantité dans la serpentine, dont la présence dans le sol augmente avec le développement du substrat.

NO₃ (accumulé en une période de végétation) ressort en définitive comme la variable chimique à pouvoir explicatif particulièrement élevé (fig. 34 et 36, graphiques 8 et 9). D'une part, selon l'axe 1, NO₃ augmente principalement avec le développement tant du substrat que de la végétation, c'est-à-dire avec l'amélioration de C/N, la désaturation, la capacité d'échange et le recouvrement. D'autre part, selon l'axe 2, et dans une bien moindre mesure, NO₃ à l'inverse diminue avec l'augmentation de la capacité d'échange et de l'acidité et avec l'abaissement de C/N, cela peut-être en lien avec un gradient d'humidité différenciant d'autres processus. Notons que dans les analyses avec N accumulé, P ne joue aucun rôle significatif.

NH₄ accumulé pour sa part, qui demeure pour ainsi dire constant fig. 57 p. 140, se trouve projeté du côté des relevés peu développés dans les projections selon les axes 1 et 2, et ne ressort comme facteur significatif que sur l'axe 3.

C et P livrent une bonne explication des différences entre les sols, tout en se comportant quasi indépendamment l'un de l'autre, C participant plus au pouvoir explicatif que P. Notons que les horizons profonds des sols contiennent extrêmement peu de P.

P est en partie inversement corrélé au Mg, bien que les deux tendent à augmenter avec le développement. Or P est plutôt plus abondant dans les sols plus humides. Cette opposition pourrait indiquer une lixiviation de Mg dans ces sols-là.

C, N et aussi K sont projetés près les uns des autres, parmi les relevés développés, dans le plan des axes 1/2, bien que la participation de N et K au pouvoir explicatif de l'axe 1 soit une fraction de celle de C. C/N par contre, élevé et projeté parmi les relevés moins développés et plutôt secs, participe fortement au pouvoir explicatif de l'axe 2.

Complexe absorbant. Les données intégrant écologiquement plusieurs facteurs, tels V T H pH, présentent des pouvoirs explicatifs supérieurs aux valeurs isolées de Ca Mg K, leur somme S et même le rapport Mg/Ca. Ainsi Mg sort surtout sur l'axe 2 et Ca surtout sur l'axe 3, alors que K n'arbore surprenamment aucun rôle décisif dans le pouvoir explicatif de ces premiers axes, bien que ses teneurs moyennes augmentent en gros de 10 fois des sols peu développés à développés (fig. 33). Quant à la teneur en Ni échangeable, fig. 34 et 36-6, elle corrèle tantôt positivement, tantôt négativement avec pH T Mg/Ca. Ni détermine l'axe 2 par 70 %. En moyenne Ni double du peu développé au développé (fig. 33).

*

Bref, dans ces analyses des similitudes entre teneurs pédochimiques limitées à la serpentine (alpine de Davos), les sols sont ordonnés le long du développement du sol et de la végétation. Les changements, dans le sens de teneurs moins extrêmes, des éléments décrits comme cruciaux sur ce substrat, soit Ni Ca Mg Mg/Ca, sont bien moindres que les changements de C N P K qui différencient ainsi le mieux les sols.

Une analyse semblable a été effectuée par SLINGSBY e.a. 1977:603 pour les serpentines du N de l'Angleterre. Leur analyse des composantes principales ordonne leurs sols selon leur degré de "serpentinité" et, suivant les données, reflète bien le grand contraste entre végétation d'éboulis et de landes. La première composante révèle de fortes charges positives pour K Al Si Ca Na, à concentrations dans la roche serpentine typiquement faibles; des charges négatives pour Ni Cr Co Mg Fe, à concentrations typiquement élevées (éléments par ailleurs inversement corrélés à la matière organique). Alors que la deuxième composante est déterminée par Mg Mg/Ca Fe Ni.

4.1.3 Rapports entre variables pédochimiques

Comparées deux à deux, les variables pédochimiques (et stationnelles) accusent des rapports de différents types (légende pédochimique annexe 1) :

- assez linéaire :

pH avec	C	T	H			
C avec	pH	N*	Mg	S	T*	
N avec	C*	K*				
S avec	pH	C	Ca*	Mg*	T*	
T avec	pH	C*	Ca*	S*		

(les * indiquent les rapports dont la régression linéaire livre un $r^2 > .80$, l'adaptation à une droite étant exacte si $r^2 = 1.00$).

- assez linéaire pour les valeurs élevées (sols développés) et diffus pour les valeurs basses (sols peu développés) :

Mg:Ca C:K P:N P:K

- l'une des variables se comporte comme facteur limitant, l'autre prenant toutes les valeurs jusqu'à une certaine limite (et réciproquement) :

C:V C:Ca C:Ca/Mg C:P C:hau K:S pH:V pH:hau rec:hau

- sans rapport (l'analyse des correspondances en suggérant éventuellement un, p. 73) : P:Mg.

Rapport C:pH. La relation entre l'augmentation de la teneur en matière organique et l'acidification accompagnant le développement des sols est surprenamment directe. Elle ressort d'une certaine manière également dans les rapports de pH et C avec l'altitude : ainsi "l'acidification maximale" trouvée à 2690 m, soit pH_C 6.8, augmente vers 2310 m à 5.0 (et vers 1600 m jusqu'à 3.0 dans l'humus brut); quant au C, quasi nul à 2700 m et s'accumulant jusqu'à 13 % à 2300 m, sa "valeur maximale" augmente de 3 % C/100m de dénivellation. Les sols à C maximal et acidification avancée correspondant aux sols les plus évolués, logent à l'étage alpin aux expositions les plus favorables, S et E (au subalpin plutôt à l'ombre).

C/N tend à être constant et livre aussi la meilleure régression linéaire, $r^2 = .97$. (Dans les analyses des correspondances, C et N séparés sont projetés près l'un de l'autre, quoique sans contribuer spécialement aux premiers axes). Plutôt supérieur dans les sols peu développés, C/N se stabilise vers 14 dans les sols développés sur serpentine et tend ainsi à une valeur intermédiaire entre celles sur silicates et carbonates, les silicates comptant des valeurs plus élevées (analyses simultanées, non publiées). C/N et l'humus sont discutés p. 86.

Rapport N:P:K. Au-dessus d'un certain seuil, P assimilable est assez lié à N total et K échangeable.

K/P augmente nettement le long du développement et suggère ainsi une tendance du sol à accumuler (ou rendre plus disponible) K échangeable par rapport à P assimilable. Rappelons que la roche serpentine contient .07 % K₂O et .05 % P₂O₅ (fig. 18a p. 34), ce qui au niveau molaire signifie un K/P = 2.1, alors que pour le seul sol où K et P totaux ont été analysés (à 70 % HClO₄) K/P = 1.2 ce qui suggère une éventuelle perte de K total par rapport à P total (cf p. 70). Les plantes pour leur part contiennent environ 8 fois plus de K que de P, et cela sur les 3 substrats (p. 170). On ne peut donc guère dire si l'un des deux éléments revêt un rôle plus limitant que l'autre. Notons simplement que la végétation peut devenir ponctuellement plus luxuriante sous l'effet de déjections d'animaux, près de perchoirs à oiseaux ou de trous de marmottes.

Rapport C:N:P discuté p. 70.

Rapport H⁺:pH (fig. 37). Le rapport assez bon entre pH_A et H⁺ = T-S, deux manières de décrire l'acidité des sols, confirme dans une certaine mesure la validité des méthodes de détermination du complexe absorbant.

Rapport S:T:V. Si le comportement des variables principales par rapport à S et par rapport à T est très semblable et du type linéaire, celui par rapport à V est diffus, bien que S/T soit largement linéaire et que V sorte en bonne place dans les analyses des correspondances (fig. 34).

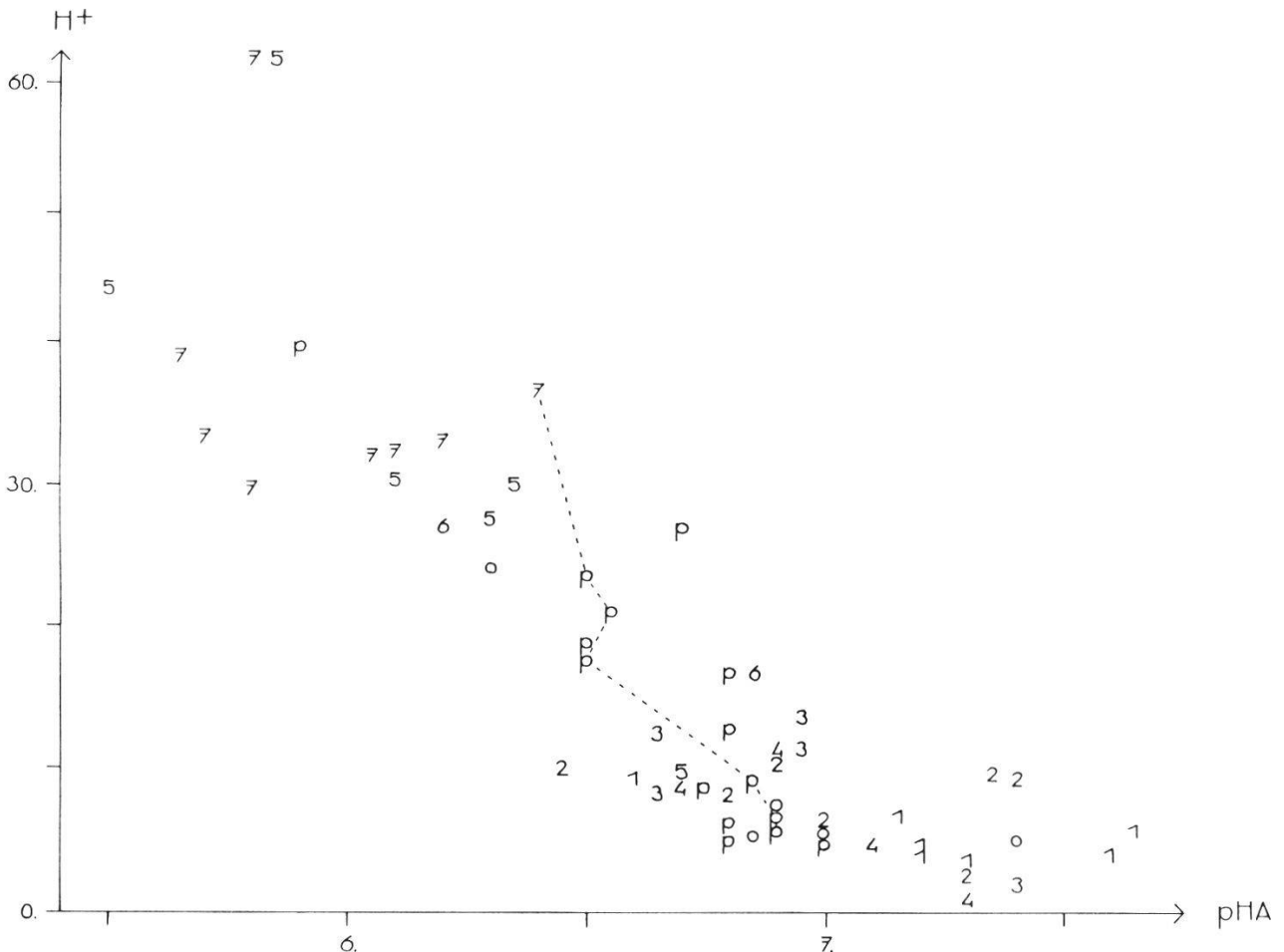


Fig. 37
Relation entre pH_A et H^+ . Légende voir fig. 36.
Relation between pH_A and H^+ . Legend see fig. 36.

Proportion Ca:Mg:K:Na. La somme des cations échangeables S est dominée aux 3/4 par Mg; Ca fait le reste, sa participation augmentant à peine le long du développement; alors que K n'atteint que 1 à 3 %, sa participation doublant des sols peu développés à développés; Na est à peu près constant.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
serpentine	28	70	2	en % de la $\Sigma Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$ échangeables [mval]
silicates	46	18	36	
carbonates	64	32	4	

Ces valeurs s'inscrivent bien p.ex. parmi celles de SASSE 1979:382sq, obtenues par les mêmes méthodes pour différentes serpentines européennes des étages inférieurs, où S se compose en moyenne de 10 % Ca, 90 % Mg et .8 à 1.6 % K, la participation de Ca variant entre 5 à 25 %. Cette dernière est élevée à Davos, en accord avec la roche-mère augite qui en contient passablement. Le rapport Mg/Ca de la fraction échangeable s'améliore le long du développement, jusque vers 1 dans l'horizon supérieur à l'étage subalpin à Davos (CAFLISCH 1974: tab.3). Ainsi seul .3 à .7 % du Mg total se retrouve sous forme échangeable, contre 2 à 6 % pour le Ca, soit 10 fois plus, et .5 à 3 % pour le K (surestimation du Ca/Mg échangeable voir p. 182). Notons en passant que dans la fraction soluble, estimée dans l'eau de percolation recueillie dans des lysimètres, le Mg fait à peu près le 95 % de ces mêmes cations, Ca le 3 à 4 % et K comme Ni le .5 à 1 % (CAFLISCH 1977:16), soit exactement les proportions de Ca:Mg:K de la roche augite, sans suggérer de lixiviation préférentielle claire de Mg (voir p. 105 et 117sq). Valeurs échangeables absolues discutées p. 71.

4.1.4 Cas particuliers : Ni, Cr, etc.

Les teneurs "totales" extraites à l'eau régale de Ni et Cr des sols de Davos, fig. 38, sont toutes du même ordre que celles trouvées dans la roche-mère, cf fig. 18a p. 34. Comparées aux teneurs trouvées dans les sols d'autres serpentines (vue d'ensemble chez BROOKS 1987:25,36 et PROCTOR e.a. 1975:278sq), celles en Ni et Cr de Davos, entre 600 et 1800 ppm, sont plutôt basses pour les ultramafites. Evidemment, ces teneurs varient suivant la composition minéralogique de la roche de départ, suivant le type d'horizon des sols, sans parler de l'incidence possible des différentes méthodes. Les meilleures comparaisons sont les valeurs déterminées par SASSE 1979:382sq, également par extraction à l'eau régale, pour différents sols serpentiniques vraisemblablement bruns, des étages inférieurs de l'Europe centrale, appartenant aux ceintures ophiolitiques méditerranéennes et hercyniennes. Ses valeurs de "l'horizon d'enracinement" n'oscillent guère qu'entre 900 à 1700 ppm Ni et 150 à 950 ppm Cr, avec Ni/Cr molaire presque toujours >1 (sans données chimiques sur la roche). Alors que les valeurs d'autres ultramafites, d'Ecosse, etc., selon d'autres auteurs, d'autres méthodes, se situent entre 1000 et 3000 ppm Ni et 2000 à >4000 ppm Cr.

Du point de vue pétrologique, les teneurs en Ni de Davos s'avèrent typiques des pyroxénites et lherzolites. A Davos même, selon PETERS 1963, l'augite, qui est la roche la plus répandue, y contient la moitié de Ni et Cr que la serpentine vraie composée des minéraux chrysotile et lizardite, fig. 15b p. 35. Le Cr, déjà plus irrégulier que Ni dans la roche, l'est encore davantage dans les sols même tempérés où il peut dépasser 10'000 ppm. Davos est donc modeste à l'égard de Ni et plus encore de Cr.

Cr et Ni totaux des sols sur serpentine de Davos sont 10 à 100 fois plus élevés que sur silicates et carbonates fig. 38. Selon HAENI (1981 communication écrite), les teneurs habituelles des sols cultivés se situent entre 2 à 50 ppm pour Ni et Cr, 1 à 20 pour Cu et 3 à 50 pour Zn (voir aussi SCHNEIDER e.a. 1984 et

sols	végétation	m		%		teneurs totales en ppm (mol.)				
		alt.	exp	pen	rec	Ni	Cr	Cu	Zn	Ni/Cr
se 98 brut	éboulis	2270	E	60	15	1290.	590.	20.8	25.4	1.94
se 109 développé	landine herb.	2290	NEE	35	20	1230.	1150.	23.8	66.1	.940
se 133 bien développé	gazon	2350	SSE	15	85	1050.	1660.	17.8	82.8	.560
op 125 bien développé	gazon	2250	NE	40	80	1080.	1840.	23.9	102.	.519
si bien développé	lande herb.	2310	E	40	80	15.2	19.2	8.1	39.3	.702
ca bien développé	gazon	2230	SE	35	70	97.7	100.	24.0	197.	.867

						%				ppm			mVal/100 g sol				%
sols				F'	pHA	pHC	C	C/N	NH4+	NO3-	P	Ca2+	Mg2+	K+	Ni2+	V	
se	98	vég.IVb	TE	21.	7.3	6.9	.2	10.	12.	2.7	.5	1.2	4.1	.026	.022	83.	
se	109	V	TE	36.	6.8	6.2	2.7	11.	2.0	62.	1.6	2.8	7.9	.095	.068	46.	
se	133	VIIb	MT	41.	6.4	6.2	8.9	11.	-	220.	4.9	9.4	23.	.53	-	48.	
op	125	VIIa	TA	37.	5.8	5.5	8.4	16.	10.	4.	3.1	10.	20.	.35	.062	50.	
si	789.10/182.38		SA	34.	4.3	3.7	31.	24.	53.	3.	15.	8.0	2.8	.84	-	14.	
ca	791.60/181.86		PH	59.	7.4	6.9	11.	12.	9.	260.	12.	40.	14.	.45	-	77.	

se = serpentine op = serp. à veines de calcite si = silicates ca = carbonates

Fig. 38

Teneurs totales extraites à l'eau régale de Ni Cr Cu Zn de quelques sols de Davos, précisés par leurs caractéristiques principales.

Total contents of Ni Cr Cu Zn, extracted by aqua regia, of soils from Davos, specified by their principal characteristics.

JUCHLER 1988:15sq,76); quant à LOUNAMAA 1956:52 qui a étudié en détail les serpentines de Finlande, il a trouvé pour des stations comparables des moyennes dans des sols ultrabasiques de 1200 ppm Ni, 4000 ppm Cr, 140 ppm Co (roches ultrabasiques 1500 ppm Ni, 2200 ppm Cr, 42 ppm Co); dans des sols silicatés de 91 ppm Ni, 140 ppm Cr, 16 ppm Co; et dans des sols calcaires de 60 ppm Ni, 110 ppm Cr, 23 ppm Co, alors que ses roches correspondantes calcaires contiennent plus de métaux lourds que les silicatées (voir aussi fig. 18b p. 35). Rappelons que selon ERNST 1974b:3 les métaux lourds ont un effet sélectif marqué sur la végétation dès que les teneurs dépassent 1000 ppm (total) dans le sol.

Les 3 échantillons de serpentine de Davos suggèrent qu'avec le développement de la station les teneurs en Ni diminuent, alors que celles de Cr augmentent. Il est connu que Ni est beaucoup plus mobile, à savoir plus lixiviable et plus disponible aux plantes que Cr; alors que Cr est très mal soluble et facilement complexé par les acides humiques. Cette tendance de Cr (et Co) à s'accumuler dans les sols jusqu'à des concentrations totales plus élevées que dans la roche-mère a déjà été signalée par LOUNAMAA 1956, DUVIGNEAUD 1966:275 et RAGG e.a. 1964 ex PROCTOR e.a. 1975:278 pour des serpentines du nord de l'Europe. (Cf séquences d'élimination fig. 52 p. 121).

Par ailleurs, STICHER p.ex. 1978:241,243, pour un sol serpentinique brun acide subalpin de Davos, observe une perte relative de Ni et accumulation relative de Cr (et Fe) dans le complexe minéral de l'horizon (B) par rapport à la roche-mère, qu'il explique par le fait que le Ni est principalement lié ici au chrysotile qui se retrouve surtout dans la fraction argile et s'altère aussi le plus facilement, alors que le Cr y est lié principalement à l'augite qui se retrouve surtout dans les fractions limon grossier et sable fin et résiste mieux à l'altération. (Exactement même observation chez WILSON e.a. 1978:200sq Ecosse, sol brun sous forêt).

Alors que Ni Cr Co ont tendance à être accumulés dans les horizons d'altération, les autres métaux Fe Mn Zn Cu Pb sont plutôt accumulés dans les horizons supérieurs riches en humus (ERNST 1974b:2, sols à métaux lourds).

La serpentine à veines de calcite du sol op 125 présente la valeur maximale en métaux lourds, à savoir en Cr. Or les teneurs en Cr estimées dans les plantes de cette placette sont aussi en moyenne le double de celles sur serpentine (fig. 70 p. 170). Il y a tout lieu de voir un reflet direct des teneurs de la roche en ces éléments dans les teneurs assimilées par les plantes.

*

La serpentine de Davos livre vraisemblablement suffisamment de soufre, fig. 39, si l'on compare les 100 à 1000 ppm S total trouvés avec les 100 à 600 ppm que citent BAUMEISTER e.a. 1978:29 pour des sols normaux. On s'est posé la question

Sol et no de relevé	ppm S	roche selon PETERS 1963 :	ppm S
sol serpentine 67	177	serpentine-augite 20 p.625	341
sol serpentine 92	98	péridotite 86 p.630	762
sol serpentine 119	872	pyroxénite 332 p.637	334
sol serpentine 132	937	pyroxénite 458 p.646	87
échantillons de référence :		serp. vraie (à v. calcite) 70 p.635	1200
roche serpentine UB-N	190	ophicalcite rouge clair 236 p.651	1300
roche ultramafique UM-4	4940	ophicalcite rouge foncé 82 p.652	438
		ophicalcite gris-vert 243 p.654	667

Fig. 39

Teneurs totales en S de 4 sols serpentiniques et de 8 roches ophiolitiques de Davos. Les échantillons de roches, aimablement mises à disposition par PETERS pour ces analyses, sont ceux-là mêmes décrits dans son travail.

Total S content of 4 serpentine soils and 8 ophiolitic rocks from Davos.

car S est avec P, après C O H N, un élément assimilé en quantités importantes par les plantes : il y atteint 500 à 800 ppm de la matière sèche, les crucifères étant connues pour avoir des teneurs particulièrement élevées (LARCHER 1973:150; MENGEL 1979:194,324).

Le S pourrait être livré principalement par le minéral pentlandite (Fe,Ni)₉S₈, si l'on considère les teneurs de l'échantillon d'augite de PETERS 1963:625 où S:Ni vaut 1:0.695.

*

Les teneurs échangeables en nutriments mineurs des sols sur serpentine de Davos se meuvent près de la limite de sensibilité des méthodes. Cela signifie en particulier des teneurs très faibles en Fe et Cr. L'Al échangeable, et donc l'acidité d'échange développée par cet ion, reste en dessous de 2 mVal/100g sol, bien que la serpentine de Davos avec ses quelques 4 % Al₂O₃ contienne relativement beaucoup d'Al par rapport à d'autres serpentines : moyenne mondiale 1.8 % Al₂O₃ (KRAUSE 1958:764), voir p. 122.

Il n'y a guère que les teneurs en Ni échangeable de la serpentine alpine qui sont plus élevées, à savoir de l'ordre de celles de K des sols peu développés : en moyenne, dans l'horizon supérieur, 10 ppm dans les sols peu développés, 20 dans les développés. Cela correspond à .5 et .4 % des places de la garniture cationique échangeable (S) occupées par Ni, ce qui est proche des autres serpentines. C'est très peu comparé p.ex. aux 30 à 60 % Zn dans les sols à métaux lourds cités par ERNST 1982:478. Par contre ces teneurs en Ni sont plutôt plus élevées que celles des serpentines des étages inférieurs. Ainsi les sols serpentiniques européens de SASSE 1979:382 comportent 5 à 10 ppm Ni, soit 1/10 des valeurs qu'y atteignent K et .05 à .20 % S (cf aussi ERNST 1974b:10); et les sols écossais de SHEWRY e.a. 1975:383 1 à 9 ppm Ni, soit .04 à .30 % S. La migration en profondeur de Ni ressort clairement des profils des sols serpentiniques de l'étage subalpin de Davos de CAFLISCH 1974:tab.3 : la teneur en Ni échangeable à 15-30 cm, de l'horizon d'altération (B), peut dépasser jusqu'à 5 fois celle à 5 cm. A titre indicatif ajoutons que les teneurs aquasolubles que CAFLISCH 1977:16 a mesurées dans les eaux de percolation de ces mêmes sols comportent .1 ppm Ni, c.-à-d. la même concentration qu'en K, ou 1/100 de la concentration en Mg qui y fait les 95 % des cations.

4.2 Azote et micro-organismes

Les bilans d'azote me semblent offrir un indice informatif de la vie qui s'est développée dans les écosystèmes, puisque presque tous développent leurs propres teneurs en N, que ce soit par l'apport, relativement parlant généralement modeste, de N par les eaux météoriques, ou plus généralement par la fixation de N₂ de l'air par les micro-organismes en symbiose ou libres. Quant au N disponible aux plantes, il est fourni essentiellement par la reminéralisation de la matière organique morte du sol, qui est quasi exclusivement l'oeuvre des micro-organismes (RUNGE 1974:202).

4.2.1 Minéralisation de l'azote

En résumé, sur notre serpentine, les teneurs en azote total N_{tot} valent pour les sols se1 peu développés et se2 développés .06 % et .6 %; en azote minéralisé N_m en 1977 sur le terrain 10 ppm et 30 ppm; correspondant à un coefficient de minéralisation N_m/N_{tot} (p. 51) de 2. % et .6 %; et 3 fois plus en chambre climatique à 20°C (fig. 42). La forme NO₃⁻ tend à dominer : NO₃⁻ momentanément surtout clairement dans les sols peu développés, à pH plus élevé; NO₃⁻ accumulé surtout dans les sols plus développés (fig. 40b et 41). Les valeurs brutes de l'azote des sols étudiés sont explicitées dans l'annexe 3, les autres valeurs brutes des sols dans l'annexe 2. Voir en outre remarques p. 51sq.

Les différences entre les années 1977 (23 sols) et 1975 (5 sols), incitent cependant à la prudence dans les interprétations ultérieures. (Selon STEWART 1975:264, la variabilité de ce type de mesures est surtout déterminée par les différences d'humidité et en second de température, voir ci-dessous.)

1977 a été à peine plus chaud et sec que la moyenne, avec .5°C de plus et 97 % des précipitations (ANNALES de l'année citée, climat p. 17; et p. 52sq). Dans les stations se1 peu développées, du moins en fin de saison (2^e et 3^e incubations, septembre très sec), la diminution du rapport NO₃⁻/NH₄⁺, conjointe à l'augmentation de NH₄⁺, dans le mouvement des teneurs momentanées aux accumulées, semble indiquer en incubation une bonne ammonification, fig. 40b. Dans les stations se2 plus développées, surtout au milieu de la saison (1^e et 2^e incubations, très pluvieux auparavant), plusieurs valeurs Nm-NH₄⁺ sont négatives : l'augmentation de NO₃⁻ et du rapport NO₃⁻/NH₄⁺, conjointe à une diminution de NH₄⁺, dans le mouvement des teneurs momentanées aux accumulées, suggère une certaine stimulation unilatérale de la nitrification dans les incubations, fig. 40b.

1975 a été plus clément que 1977, avec .9°C de plus que la moyenne et 86 % des précipitations habituelles, août et septembre 2°C à 3°C plus chauds que 1977, sans être aussi sec en septembre. Cette année-là en gros, NH₄⁺ a été plus favorisé dans les incubations. Par ailleurs les valeurs négatives sont nombreuses et touchent autant NH₄⁺ que NO₃⁻, suggérant en plus de la nitrification également de la dénitrification (anaérobie !), fig. 40a.

*

La minéralisation nette, comme l'activité des micro-organismes plus généralement, est connue pour être irrégulière. Ses fluctuations sont induites climatiquement en particulier par l'humidité et la température. REHDER (1978:324) souligne ainsi par exemple l'effet favorable sur la Nm du gel et du dégel par rapport aux températures basses constantes. La minéralisation nette est tributaire, en outre, des facteurs de station tels l'aération et le pH du sol, les nutriments disponibles, le rapport C/N, N/P, le cycle de N dépendant aussi de P (LARCHER 1973:129; WILLIAMS 1968:137), et de la présence ou non de calcaire.

ppm terre sèche 0-5 cm 1975			Nm rapporté à 42 jours						Nm rapporté à 128 jours				pHaf
			N-NH ₄ ⁺			N-NO ₃ ⁻			Nm	Ntot	Nm/ Ntot x100 %	NO3-/ NH4+	
			10.8 1er	14.9 2e	\bar{m}	10.8 1er	14.9 2e	\bar{m}					
date		nb											
se1	Na	3	1.3	0.	.67	4.0	1.7	2.8		600.		4.2	6.9
vég.	Nm	T 3	-1.0		-1.0	-1.4		-1.3	-6.5		-1.1	1.3	
I-IV	Nm	L 3	-3.3	11.	3.7	-1.7	1.0	- .35	13.		2.2	- .1	
se2	Na	2	2.0	2.0	2.0	5.0	2.5	3.8		4000.		1.9	5.9
vég.	Nm	T 2	-2.0		-2.0	2.0		2.0	0.		0.	-1.0	
V-VII	Nm	L 2	-3.3	8.0	2.4	4.0	3.7	3.9	19.		.47	1.6	

Fig. 40a

Azote NH₄⁺ et NO₃⁻ 1975, 3 et 2 sols : momentané (Na) et minéralisé en 6 semaines (Nm); incubation in situ (T) et en laboratoire (L); se1 stations peu développées, se2 plus développées. (Valeurs brutes annexe 3).

NH₄⁺ and NO₃⁻ nitrogen 1975, 3 and 2 soils : actual content (Na) and mineralized in 6 weeks (Nm); field incubation (T) and standard incubation in laboratory 20°C (L), reported up to 42 days; se1 little developed habitats, se2 better developed. (Raw data annex 3).

ppm terre sèche 0-5 cm 1977			Nm rapporté à 42 jours															
			N-NH ₄ ⁺				N-NO ₃ ⁻				N-NO ₃ ⁻ /N-NH ₄ ⁺							
			date	12.7	10.8	2.10		12.7	10.8	2.10		12.7	10.8	2.10				
nb			1er	2e	3e	m̄	1er	2e	3e	m̄	1er	2e	3e	m̄				
se1	Na	8	.88	.13	.13	.38	3.3	4.0	3.1	3.5	3.7	32.	25.	20.				
vég.	Nm	T 8	1.5	.6		1.0	4.8	2.4		3.6	3.2	4.2		3.7				
I-IV	Nm	L 8	1.5	2.5	1.8	1.9	13.	8.	7.6	9.6	8.7	3.2	4.3	5.4				
se2l	Na	7	10	8.0	1.7	6.7	6.7	5.9	4.4	5.7	.65	.73	2.6	1.3				
vég.	Nm	T 7	1.2	-1.1		.07	15.	11		13.	13.	-11.		1.1				
V-VI	Nm	L 7	-7.2	-3.5	3.1	-2.5	38.	29	21.	29.	-5.3	-8.3	6.8	-2.3				
se2g	Na	8	6.3	11.	.5	5.9	4.0	4.4	4.6	4.3	.64	.4	9.2	3.4				
vég.	Nm	T 8	3.3	2.1		.58	6.5	12.		9.0	2.0	-5.8		-1.9				
VII	Nm	L 8	.45	6.7	12.	6.3	30.	38.	28.	32.	66.	5.8	2.4	25.				

Fig. 40b

Azote NH₄⁺ et NO₃⁻ 1977, 23 sols : momentané (Na) et minéralisé en 6 semaines (Nm); incubation in situ (T) et en laboratoire (L); se1 végétation clairsemée, se2l landes, se2g gazons. (Somme N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ voir fig. 29 p. 52; valeurs ultérieures fig. 42; valeurs brutes annexe 3).

NH₄⁺ and NO₃⁻ nitrogen 1977, 23 soils : actual content (Na) and mineralized in 6 weeks (Nm); field incubation (T) and standard incubation in laboratory 20°C (L), reported up to 42 days, se1 scanty vegetation, se2l heath, se2g lawn. (Sum NH₄⁺ -N and NO₃⁻ -N see fig. 29 p. 52; further values fig. 42; raw data annex 3).

ppm Nm/128 jours terre sèche 0-5 cm 1977	incubations 1 + 2					incubations 1 + 2 + 3				
	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nm	NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	Nm/ Ntot x100 %	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Nm	NO ₃ ⁻ / NH ₄ ⁺	Nm/ Ntot x100 %
	ppm	ppm	ppm			ppm	ppm	ppm		
se1 clairs. Nm T 8	2.8	9.9	13.	3.5	2.0					
vég. I-IV Nm L 8	6.4	31.	38.	4.8	6.0	6.0	28.	34.	4.7	5.4
se2l landes Nm T 7	- .6	39.	38.	-65.	.78					
vég. V-VI Nm L 7	-15.	100.	85.	- 6.5	1.7	-6.7	87.	81.	-13.	1.6
se2g gazons Nm T 8	- .2	31.	31.	-160.	.47					
vég. VII Nm L 8	12.	106.	118.	8.6	1.8	21.	99.	120.	4.7	1.8

Fig. 41

Azote minéralisé Nm-NH₄⁺ et Nm-NO₃⁻ en une période de végétation : comparaison des incubations in situ (T) et en laboratoire (L). La minéralisation sur le terrain ayant comporté 2 incubations au lieu des 3 en chambre climatique, elle a été estimée d'une part pour les incubations 1+2 et rapportée à 128 j; d'autre part pour les incubations 1+2+3 totalisant 128 j.

Nitrogen mineralization NH₄⁺ -Nm and NO₃⁻ -Nm during a growing season : relation between field (T) and standard (L) incubations. Field mineralization involved 2 incubations whereas laboratory involved 3. So mineralization is considered first for incubations 1+2 and reported up to 128 days, secondly for 1+2+3 covering up to 128 days.

Signalons que la minéralisation est maximale là où se concentrent le plus de racines fines, dans le Caricetum firmæ par exemple entre 2 et 10 cm (REHDER 1976:58).

Les valeurs négatives signifient que les micro-organismes immobilisent plus de N minéral qu'ils n'en minéralisent. Cette immobilisation biologique ou réorganisation serait typique de certaines conditions du milieu, en particulier C/N élevé (DUCHAUFOR e.a. 1979:386,388; RUNGE 1974:215) ce qui n'est pourtant guère le cas ici. Mais il ne faut pas oublier que les effets sur les micro-organismes du tamisage et de l'aération qui l'accompagnent, ainsi que la suppression des fluctuations en labo, sont difficiles à évaluer (REHDER 1971:760, 1976:411; RUNGE 1974:202). Toujours est-il que les micro-organismes immobilisent beaucoup mieux NH_4^+ que NO_3^- et qu'une aération et une humidité suffisantes, en plus d'un pH neutre à basique, avantagent la nitrification (DUCHAUFOR e.a. 1979:388; LARCHER 1973:128). Bref, pour la serpentine il est plus aisé de comprendre, si déjà, la stimulation dans les incubations de la nitrification (1977) plutôt que de l'ammonification (1975). Même si la stimulation par le tamisage est censée être d'autant moins forte que les sols sont biologiquement actifs, p.ex. stimulation par le tamisage négligeable pour les mull (RUNGE 1974:217), ici moder à mull (voir ci-dessous).

En général les sols alpins et subalpins sur silicates ont une minéralisation nette inférieure à ceux sur carbonates (REHDER 1978:326). Pour autant que les mesures puissent être comparées, fig. 42, la minéralisation nette sur serpentine se situe entre celle sur silicates et carbonates. Par contre, le coefficient de minéralisation annuelle (p. 52), surtout dans les sites peu colonisés, y est remarquablement haut et n'a rien à envier à celui sur carbonates.

4.2.2 Azote et humus : discussion

Le taux de minéralisation de l'azote et le rapport C/N permettent une première caractérisation du type d'humus d'un sol (DUCHAUFOR e.a. 1977:58).

Sur notre serpentine, fig. 42, non seulement les teneurs en N_{tot} atteignent des valeurs tout à fait habituelles dans les stations plus développées, mais surtout les coefficients de minéralisation annuelle indiquent un retour surprenamment efficace de l'azote à la disposition des plantes. En particulier dans les sols peu développés où N_{tot} est encore rare et peut-être encore peu fixé dans des structures humiques stables, c'est-à-dire relativement bien minéralisables, le coefficient de minéralisation atteint 2. % (contre .6 % dans les sols développés, valeurs in situ). Cela confirme le mull comme type d'humus suggéré par la morphologie (fig. 44) : ainsi DUCHAUFOR e.a. 1977:60 citent des coefficients de minéralisation annuelle de 3 % et 1 % pour des mull forestiers de plaine et de montagne; et .5 à 1. % pour des mull calcaïques sur rendzine, où le calcaire ralentit la minéralisation. Par ailleurs la forme de l'azote minéralisé prévalant dans les sols à mull est NO_3^- (STRASBURGER 1983:977), comme c'est le cas sur serpentine à Davos.

La serpentine et les carbonates ont en commun un pH à tendance basique (et souvent un taux de saturation élevé). Or c'est au voisinage de la neutralité que la plupart des bactéries ont leur maximum d'activité qui est en lien avec la rapidité d'humification biologique (DUCHAUFOR e.a. 1977:40, LEMEE 1978:140). Mais le calcaire actif, connu pour protéger la matière organique contre la dégradation microbienne (DUCHAUFOR e.a. 1977:44), est absent de la serpentine. Par contre la présence de Fe et Al libres conjointe à de l'argile - qui au-dessus d'un certain seuil écologique considéré ici comme dépassé garantissent la brunification p. 95 - accélèrent l'humification jusqu'à permettre la formation d'un mull, et pas seulement d'un mor ou moder (o.c.:48,99,139). On peut donc concevoir que les taux de minéralisation soient relativement élevés sur serpentine parce que malgré les notoires difficultés d'approvisionnement en nutriments,

l'activité microbienne y bénéficie de plusieurs conditions favorables sans le frein du calcaire.

De même, les moyennes des rapports C/N (p. 140) des stations sur serpentine développée des unités de végétation IV à VII qui varient de 11 à 14, à peine plus pour les landes que pour les gazons humeux, parlent pour du mull; alors que

région végétation altitude, sol	ho cm	pH	C/N	Ntot %	Nm/ Ntot x100 %	Nm g/m ² pv	pv s	incubation: T in situ L en labo s semaine	forme prévalant	auteur année:page
Davos, Alpes centr. E (CH)		a								
se1 vég. clairsemée I-IV 2400 m ranker alpin	0-5	7.1	20.	.06	2.0 5.4	.32 .85	18	T /6s L 20°C /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺ d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	
se2l landes, vég. V-VI 2300 m ranker alpin brunifié		6.5	14.	.49	.78 1.6	.95 2.0	18	T /6s L 20°C /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺ d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	
se2g gazons, vég. VII 2300 m ranker alpin brunifié		6.2	13.	.66	.47 1.8	.78 3.0	18	T /6s L 20°C /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺ d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	
Nardetum alpigenum 2400 m rank.a.brunif.	1-6	5.1				.68	18	L 20°C /6s	d NH ₄ ⁺ >NO ₃ ⁻	GIGON 1971:74
Seslerio-Semperviretum 2400 m rendzine		7.3				1.6 c	18	L 20°C /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	"
Alpes centrales (A)			c	c	c					
Lande à Vaccinium 1980 m podzol	0-15	2.8	36.	.58	.070	.31	21	T /6s	NH ₄ ⁺ >NO ₃ ⁻	REHDER e.a. 1978:313,314
Landine à Loiseleuria 2000 m podzol		2.6	35.	.67	.085	.43	21	T /6s	NH ₄ ⁺ >NO ₃ ⁻	et LARCHER 1977b:313
Loiseleurietum 2175 m podzol		3.9	22.	.67	.029	.14	18	T /6s	NH ₄ ⁺ >NO ₃ ⁻	"
Salicetum herbaceae 2500 m podzol-gley		4.3	17.	.20	.067	1.0	12	T /6s		REHDER e.a. 1978:321
Caricetum curvulae 2500 m podzol alpin		4.9	20.	.33	.006	.16	12	T /6s		"
Alpes calcaires N (A)			c	c	c					
Nardetum alpigenum 1930 m brun podzol	0-15	5.3	13.	.64	.77	3.7	15	T /6s	d	GÖKCEOGLU ea 1977:321,322
Caricetum firmae 2160 m rendz.alpine		7.	13.	.73	.37	2.0	15	T /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	REHDER 1976a:412sq
Caricetum firmae 2010 m rendz.alpine		7.	16.	1.1	.44	3.7	15	T /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	1976b:50
Seslerio - Semperviretum 2150 m rendz.alpine		7.	12.	1.2	.37	3.3	15	T /6s	d NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	
Elynetum 2000 m						5.5	15	T		REHDER 1971:761,763
Hautes-Pyrénées (F)				c	c					
St à Elyna spicata 2810 m rendz.alpine	0-5	6.9	11.	1.3	.93	3.0	2!	L 28°C?/2s	d début pv: NH ₄ ⁺ >NO ₃ ⁻	LABROUE e.a. 1977:66
St à Carex curvula 2750 m brun calc.		7.1	11.	.67	1.0	1.8	2!	L 28°C?/2s	d fin pv : NO ₃ ⁻ >NH ₄ ⁺	"
St à Plantago alpina 2750 m brun mésotr.		5.8	11.	.21	1.7	.88	2!	L 28°C?/2s	d "	"
St à Salix retusa 2750 m pseudogley		7.5	10.	.34	1.3	1.1	2!	L 28°C?/2s	d "	"
végétation artique taïga						2. 6.				RODIN e.a. 1967

légende

pv période de végétation, vegetation period

T incubation in situ, field incubation

L incubation en labo, incubation in laboratory

s semaine, week

a pHa frais, fresh

c calculé ou transformé, calculated or transformed

d densité du sol posée : .5g/cm³ : assumed soil density

Fig. 42

Azote minéralisé (Nm) en une période de végétation : serpentine de Davos (1977) comparé à d'autres stations alpines.

Mineralized nitrogen (Nm) during one vegetation period : serpentine of Davos (1977) compared to other alpine communities.

les stations peu développées des unités I à III, qui ont des C/N beaucoup plus irréguliers, en moyenne 15 à 20, parleraient pour du moder, abstractions faites de l'inhomogénéité des niches propres à ces stations et des coefficients de minéralisation annuelle élevés qui y suggèrent une activité biologique assez élevée. Ainsi DUCHAUFOR e.a. 1977:58 citent des rapports C/N de 10 à 15 pour les mull, à savoir 10 à 12 en milieux peu acides et saturés en cations, 12 à 15 en milieux acides; et des rapports C/N de 15 à 25 pour les moder; sans qu'il n'existe, en dehors de l'horizon Ao, de corrélation valable entre C/N et le taux de minéralisation en azote.

On sait combien la teneur élevée en azote de la litière d'une part accélère l'humification ou décomposition de la litière, et d'autre part a une action favorable indirecte sur la rétention des cations alcalino-terreux (o.c.:40,46, 94). Sur serpentine, à en juger les rapports C/N des espèces (p. 170), la litière provient dans les unités de végétation peu développée en majorité d'espèces à C/N bas (inférieur à 25) censées former une litière "améliorante"; dans les gazons de l'unité VII en majorité d'espèces à C/N moyen (30 - 45) telles graminoides etc.; auxquelles se joignent dans les landines et landes des unités V et VI quelques buissons nains à C/N élevé censés former une litière à tendance "acidifiante". Or en général le rapport C/N favorable à une dégradation microbienne se situe entre 10 et 20, la minéralisation nette apparaissant au-dessous d'un C/N critique entre 20 et 25 (LARCHER 1973:126; DOMMERGUES e.a. 1970:215).

Le cas de ces landes et landines est caractéristique de la serpentine : malgré une litière partiellement à C/N élevé, en principe mal minéralisable, il n'y a pas d'accumulation d'humus brut. Il se peut que la capacité neutralisante du sol suffise à maintenir une bonne minéralisation de cette litière, à moins que ce ne soit l'azote amené par les végétaux non ligneux (cf DUCHAUFOR e.a. 1977:47), comme il se peut que la productivité vraisemblablement maigre y joue un rôle déterminant. Etonnamment les différences entre incubations in situ et en laboratoire vont en sens inverse, fig. 41 : comparées aux gazons, les landes minéralisent plus d'azote in situ et moins en laboratoire, la différence étant surtout créée par le comportement de NH_4^+ net en laboratoire, immobilisé dans les sols des landes et minéralisé dans ceux des gazons. Bref, ces landes et landines diffèrent ainsi passablement de celles de REHDER e.a. 1978:314, plus unilatérales dans leur végétation, à couche d'humus brut importante, à pH radicalement plus acide et à minéralisation nettement plus faible (fig. 42).

On peut se demander en passant, s'il faut envisager ici la contribution des mycorhizes, associés à la plupart des espèces ligneuses (en principe éliminés en incubation), dont le travail compensatoire est connu là où la minéralisation nette, si ce ne sont les apports nutritifs, sont maigres (LARCHER 1973:130; REHDER e.a. 1978:324). Cet aspect n'ayant pas été traité ici, je me borne à citer CHIARIELLO e.a. 1982:941 et TRAPPE 1977 (voir p. 91).

*

En résumé, ces sols alpins sur serpentine se révèlent biologiquement bien actifs et présentent un degré d'incorporation de la matière organique dans la matière minérale assez respectable pour former des moder à mull. Or le mull est estimé correspondre à une efficacité maximale du cycle biogéochimique des bases (DUCHAUFOR e.a. 1977:136). Plus généralement ROBERT e.a. 1981:334 en arrivent à la conclusion que le milieu de haute montagne, trop longtemps considéré comme peu évolué, constitue en réalité un milieu, entre autres biologiquement, très actif. L'analyse des fractions de l'humus, des formes du fer, de la protéolyse, des acides aminés libres, de même qu'une estimation de la productivité, sont indispensables pour se faire une idée plus différenciée des sols serpentiniques. Cela permettrait entre autres de se prononcer sur les suppositions de LABROUE e.a. 1977:74 qui, au vu des faibles teneurs en azote minéral et des fortes quantités d'acides aminés libres, se demandent si les plantes alpines (ici sur carbonates) n'absorbent pas massivement ces derniers pour assurer leur nutrition azotée. L'alimentation en azote par d'autres sources que NH_4^+ et NO_3^- minéral pourrait également s'étendre à d'autres composés (voir BAUMEISTER 1978:93).

L'action déterminante que la végétation exerce sur l'humification a suggéré d'idée d'une évolution convergente des humus sous une même végétation et sur roches-mères différentes. Cela pour autant que le milieu minéral ne joue pas le rôle principal, comme le calcaire pour les rendzines (DUCHAUFOR e.a. 1977: 47) et comme c'est plutôt le cas en milieu alpin. Cette évolution convergente des humus est discutée pour l'étage alpin chez BARTOLI e.a. 1979:81sq,88sq; voir aussi C N P p. 70. A la lumière des données limitées glânées à Davos, bornons-nous à dire que la serpentine alpine, du moins en ce qui concerne l'humus, pourrait s'avérer non seulement moins extrême que les carbonates vu l'absence de calcaire actif inhibiteur de la minéralisation, mais encore moins extrême que les silicates, vu les pH ne devenant pas aussi acides et la minéralisation plus active.

4.2.3 Micro-organismes du sol

Un relevé ponctuel de la densité de germes sur 4 sols de différents substrats (fig. 43 et détails p. 53) montre la serpentine régulièrement pourvue dans toutes les catégories de micro-organismes retenues. Bien que plus modestes que sur les sols adjacents de 1/5 à 1/2, ses densités de germes restent néanmoins dans un ordre de grandeur semblable :

- les 2 sols sur serpentine sont dans toutes les catégories plus pauvres que le sol sur carbonates; plus riches en bactéries ammonifiantes et hétérotrophes que le sol sur silicates;
- la lande se2 est 2 à 3 fois plus riche que l'éboulis fin se1 et plus encore en bactéries dénitrifiantes et hétérotrophes;
- le sol sur silicates n'excède celui sur carbonates qu'en bactéries dénitrifiantes.

Notons encore que le sol sur carbonates compte le plus de germes et que c'est sur les milieux à extrait de carbonates (pH 7.6) que les micro-organismes des 4

micro-organismes/ g de terre sèche = dry soil	se1	se2	si	ca	transformation de l'azote	kcal/ mole [⊗]
pH	6.7	6.0	5.0	7.6		
fi bactéries fixatrices d'N ₂	9'100	27'000	17'000*	59'000	N ₂ → NH ₃ , NH ₄ ⁺	-150
ch champignons - fungi	8'600	13'000	34'000	47'000	-NH ₂ → NH ₃ , NH ₄ ⁺	
ac actinomycètes	8'400	27'000	9'400*	33'000	-NH ₂ → NH ₃ , NH ₄ ⁺	
he bactéries hétérotrophes	6'300	26'000	11'000	46'000	-NH ₂ → NH ₃ , NH ₄ ⁺	
am bactéries ammonifiantes	8'200	13'000	1'200	57'000	-NH ₂ → NH ₃ , NH ₄ ⁺	+180
ni bactéries nitrifiantes	12'000	29'000	56'000	48'000*	NH ₄ ⁺ → NO ₃ ⁻	+ 80
de bactéries dénitrifiantes	3'300	28'000	134'000	42'000	NO ₃ ⁻ → N ₂ O, N ₂	+560
total	56'000	160'000	260'000	330'000		
bactéries ∑ fi+he+am+ni+de	39'000	120'000	220'000	250'000		
bactéries/ac	4.7	4.6	23.	7.6		* : plus colonies
ni/am	1.6	2.2	48.	.85		couvrantes

⊗ selon DELWICHE 1970 ex LARCHER 1973:124.

Fig. 43

Comparaison de la densité en germes de 4 sites de Davos, en septembre, sur placettes sans végétation, vers 2300 m : se1 serpentine peu développée, se2 plus développée, si silicates, ca carbonates. Comptages sur milieux sélectifs à l'extrait de terre-mère (détails p. 53).

Comparison of the micro-organism density of 4 sites in Davos, single sampling in September, from spots free from vegetation, around 2300 m : se1 little developed serpentine, se2 better developed serpentine, si silicate, ca carbonate. Counting done on selective mediums with parent-soil extract (details p. 53).

sites croissent le mieux, sur ceux à extrait de serpentine le moins bien. Quant au nombre de colonies différentes, les échantillonnages sur serpentine et sili-cates en présentent en gros un nombre semblable, celui sur carbonates un quart de plus.

*

Parmi les rares qui aient dénombré les germes sur serpentine, LIPMAN (1926:36, Oregon) a trouvé 16'000 - 300'000 organismes/g de terre, ce qui suggère une serpentine très extrême (voir aussi TESIC et RITTER p. 93). Sur les sols à métaux lourds, ERNST (1974b:11) constate que l'activité microbienne est faible, individus et espèces peu nombreux, et précise que ces sols ne se distinguent des autres que par leur teneur en métaux lourds et leur activité microbienne, alors que la serpentine accuse une carence en macronutrients en plus. Quant à un éco-système alpin sur carbonates, LABROUE (e.a. 1977:68, Pyrénées) y dénombre des densités de 10^6 à 10^7 , soit d'une à deux décimales plus élevées qu'à Davos. Rappelons ici que les micro-organismes sont non seulement plus actifs en milieu neutre ou basique, mais également plus nombreux (WALTER 1973:226).

Les quelques résultats de Davos et les quelques travaux sur les micro-organismes de la serpentine (résumés chez PROCTOR e.a. 1975:340) suggèrent que ce substrat abrite moins d'individus et d'espèces que les substrats adjacents. C'est reprendre un thème bien connu pour la flore vasculaire, semblant s'étendre également à la flore des mycorhizes et des grands champignons (voir TRAPPE et MAAS p. 91). Pauvreté en individus et en espèces, accompagnée le plus souvent d'une haute proportion d'espèces propres : c'est dire qu'on peut s'attendre à des espèces propres aussi chez les micro-organismes, surtout si l'on songe aux taux élevés de mutations qui caractérisent ces derniers.

Un autre aspect est abordé par TADROS (1957:22, Californie) dont les expériences suggèrent que l'absence de certains micro-organismes des sols de serpentine peut y confiner certaines espèces.

Fixation d'azote

Compte tenu du contexte alpin, les bactéries libres fixatrices de N_2 sont assez bien représentées sur serpentine, fig. 43 : leur densité pour se2 s'élève à la 1/2 de celle sur carbonates, pour se1 au 1/4. (Azotobacter est absent de se1, à peine présent sur se2 et le plus fréquent sur silice, selon un relevé du 21.8.1978).

Quant à la fixation symbiotique de N_2 , elle est vraisemblablement à peu près négligeable, les seuls porteurs habituels de nodosités étant Anthyllis alpestris et Lotus alpinus, qui ne revêtent qu'un rôle secondaire dans les landes et gazons, donc sans être pionnières. Aussi peut-on s'imaginer qu'une certaine importance à l'égard de la fixation d'azote revienne aux algues bleues et aux lichens.

*

Les écosystèmes alpins dépourvus de légumineuses joueraient simplement le rôle de filtre biologique vis-à-vis des apports météoriques, mais sans inconvénients, suggèrent TOSCA (e.a. 1981:41,46) : sur les substrats carbonatés des Pyrénées, 1750 m, où ils ont mesuré l'activité nitrogénasique, la fixation biologique d'azote n'atteint guère que 1/5 à 1/10 des apports météoriques d'azote de l'été, et cette fixation s'y révèle essentiellement symbiotique, les légumineuses y jouant le rôle principal, suivies des lichens, alors que la fixation libre aérobie et anaérobie est extrêmement réduite.

Les précipitations en tant que source majeure d'azote ont déjà été évoquées pour la serpentine (Maryland, CLEAVES e.a. 1974 ex FERLIZZI e.a. 1979:207).

Toujours sur sites carbonatés alpins des Pyrénées, abordés cette fois-ci par leur densité en germes, les fixateurs d'azote libres sont avant tout anaérobies, censés jouer un rôle non négligeable au moins au printemps et en automne; en

second aérobies, surtout Cyanophycées, supposées fixatrices d'azote, actives après la phase d'anaérobiose printanière; alors que les Azotobacter sont peu nombreux (LABROUE e.a. 1977:71sq).

Azotobacter dont LIPMAN (1926:318, Californie) n'a guère vu que quelques rares spécimens sur sa serpentine.

En principe l'activité des bactéries fixatrices libres est liée à un pH non acide et à une richesse en C et en nutriments majeurs, la réaction de réduction de N_2 étant très endergonique (LEMEE 1978:115sq et fig. 43). Encore une fois, vu que le pH sur serpentine est favorable, c'est vraisemblablement l'approvisionnement nutritif qui est limitant.

On sait le rôle important que les micro-organismes autotrophes et libres, tels les algues bleues, jouent sur sols bruts de montagne et de stations extrêmes (LARCHER 1973:124). Sans disposer de données similaires pour les sols serpentiniques, il est intéressant de savoir que la flore limnocolique du Totalpsee de Davos, situé sur serpentine, se compose unilatéralement de Cyanophycées et Diatomées, alors que les Chlorophytes manquent totalement (MESSIKOMMER 1942:323). Pour leur part, les algues des sols d'une serpentine de Maryland comprennent Cyanophytes, Chrysophytes et Chlorophytes, avec 3 genres de Cyanophycées dont on connaît des espèces fixatrices d'azote : l'absence d'activité nitrogénasique dans ces populations d'algues bleues-vertes au début du printemps est suggérée due, plus encore qu'aux variations saisonnières, à la carence en Mo commune aux sols serpentiniques (TERLIZZI e.a. 1979). V pourrait remplacer Mo dans cette fonction (SCHLEGEL 1972:320). (A Davos les teneurs des plantes en Mo sont du même ordre que celles sur silicates et 1/7 de celles sur carbonates, p. 170). Que Mo soit une source de carence pour la nitrogénase sur serpentine est déjà l'hypothèse de WHITE 1967 (ex PROCTOR e.a. 1975:339) qui y rapporte le nombre inférieur de nodules de ses plantes de serpentine en Orégon. Plus tard (WHITE 1972), il démontrera que la fréquence des légumineuses, leur activité fixatrice et leur taille sont inversement corrélées à la teneur des sols en Mg, Ni et Cr.

Champignons et Actinomycètes

L'action des actinomycètes est complémentaire à celle des bactéries et des champignons dans la dégradation de la matière organique. Grâce à leur sobriété, les actinomycètes jouissent d'une très grande extension. Si les champignons ont tendance à préférer les milieux acides, les actinomycètes fréquentent plus abondamment les milieux alcalins. (DOMMERGUES e.a. 1970:27; LEMEE 1978:140).

Il semble intéressant de noter que la proportion des actinomycètes par rapport aux bactéries, fig. 43, est la plus haute sur serpentine, vers 20 % sur les deux sols se1 et se2, soit 2 fois le rapport sur carbonates, 4 fois celui sur silicates. Ces valeurs restent cependant dans la norme de 5 à 30 % nommée par DOMMERGUES.

LIPMAN (1926:317, Orégon) se borne à noter la rare présence de champignons et d'actinomycètes sur serpentine. Puis TRAPPE (1977:213, Orégon) décrit une flore mycorrhizienne de serpentine qui se distingue de celle des substrats adjacents en comptant la moitié moins d'espèces, dont la moitié des espèces limitées à la serpentine. Et MAAS (e.a. 1969:1109, Washington) décrit les grands champignons d'une serpentine comptant également la moitié moins d'espèces, tout en ayant la moitié des espèces limitées à la serpentine.

Dénitrification

La dénitrification signifie une perte en N minéral pour l'écosystème. La dénitrification s.s. étant anaérobie, elle est fréquente dans les sols compacts ou

humides. Son optimum se situe à des pH plus ou moins neutres à basiques et elle est stimulée par une certaine richesse en matière organique (LEMEE 1978: 117). Elle est liée à un grand gain d'énergie pour les micro-organismes (fig. 43).

Sur serpentine les bactéries dénitrifiantes atteignent un nombre assez respectable, fig. 43, bien que 1.5 fois moins sur se2 que sur carbonates. Leur activité a été suggérée par les minéralisations de 1975, dans la série "se1". En effet, la dénitrification ne ressort pas explicitement du bilan net de minéralisation, mais il se pourrait bien qu'on sous-estime l'activité et dénitrifiante et nitrifiante par le fait que les deux peuvent s'annuler. Tout autant que l'abondance extrême de dénitrifiantes sur silicates pourrait contribuer à un déplacement des bilans en faveur de NH_4^+ . Cette abondance pourrait en quelque sorte rapprocher la lande se2 du site sur silicates, alors que la pauvreté en dénitrifiantes rapprocherait l'éboulis se1 du site sur carbonates : rapprochements en tout cas légitimes au niveau de la végétation (p. 208).

Sur leurs sols alpins sur carbonates LABROUE (e.a. 1977:71 sq) trouvent 10^1 à 10^3 fois plus de nitrifiantes que pour les densités maximales à Davos, sans que l'anaérobiose de leurs sols soit en quoi que ce soit plus évidente. Comme à Davos, on ne peut guère concevoir de dénitrification qu'après la fonte des neiges, à moins que les sols bruts lourds ne soient suffisamment compacts pour la favoriser pendant les périodes humides. Vu le passage apparaissant si difficile d'une végétation clairsemée à des gazons ou landes fermées, il semble légitime de se demander s'il pourrait y avoir une perte substantielle par dénitrification, réaction qui compte à son avantage d'être fortement exergonique (fig. 43).

4.2.4 Ammonification et nitrification, régimes NH_4^+ et NO_3^-

Avant d'aborder la serpentine, rappelons quelques caractéristiques des processus d'ammonification et nitrification.

Dans le sol l'azote disponible aux plantes, principalement sous forme minérale NH_4^+ et NO_3^- , résulte essentiellement de la reminéralisation microbienne de la matière organique morte du sol et correspond à bien moins de 5 % de l'azote total, lié organiquement surtout dans l'humus (DUCHAUFOR e.a. 1979:386).

NH_4^+ est la forme prévalente en milieu acide, surtout si appauvri en nutriments ou dégradé, principalement sous forme absorbée au complexe absorbant, semblablement à K^+ ;

NO_3^- est la forme prévalente en milieu neutre à basique, en solution, donc facilement lixiviable, surtout en hiver ou dans les sols sans couverture végétale (STRASBURGER e.a. 1983:977; KINZEL 1982:283; LEMEE 1978:117; LARCHER 1973:144; ELLENBERG 1964:85).

Dans le sol, les micro-organismes transforment l'azote organique d'abord en NH_4^+ , d'autres celui-ci en NO_3^- , les deux réactions étant exergoniques (fig. 43). L'ammonification peut être l'oeuvre d'un nombre considérable de micro-organismes, bactéries, champignons et même fréquemment actinomycètes, et elle a lieu dans presque toutes les conditions écologiques (DOMMERGUES e.a. 1970: 193,216 sq). Alors que la nitrification est essentiellement l'apanage de deux genres autotrophes aux exigences plus précises : les bactéries nitrifiantes sont neutrophiles ou basophiles, fortement inhibées si le pH est inférieur à 4.5 et l'aération insuffisante, et si le couvert végétal livre une litière formant de l'humus brut ou livre certains produits de métabolisme végétal comme p.ex. les éricacées (DUCHAUFOR e.a. 1979:387; DOMMERGUES e.a. 1970: 202,207-210; LARCHER 1973:128; KINZEL 1982:284,297). Toutefois bien des micro-organismes surtout hétérotrophes sont capables de contribuer à la nitrification en dehors de ces conditions, en particulier sous pelouses (DUCHAUFOR e.a. 1979:387; DOMMERGUES e.a. 204,208; RUNGE 1974:221). Ajoutons encore que les micro-organismes ammonifiants sont en général beaucoup plus abondants dans la rhizosphère, alors qu'il semble que les nitrifiants soient plus abondants hors de la rhizosphère (DOMMERGUES e.a. 1970:572), ce qui peut intéresser la serpentine.

En ce qui concerne les stations alpines sur carbonates, TOSCA (e.a. 1986) démontre que les souches nitrifiantes sont psychrophiles en haute altitude, avec un maximum d'activité vers 15°C; LABROUE (e.a. 1977:74) constate que la nitrification semble s'y accommoder des températures basses et même des alternances gel-dégel qui favorisent l'aération du sol, et qu'elle y est surtout active en automne - à l'inverse, l'ammonification s'y révèle la fonction physiologique du cycle de l'azote la plus sensible aux basses températures. De ce fait ces sols alpins sont relativement pauvres en azote minéral et, corrélativement, riches en acides aminés libres parce que la protéolyse n'est que faiblement inhibée par le froid.

*

Sur serpentine à Davos, le léger excès des densités de bactéries nitrifiantes sur les ammonifiantes fig. 43, qui vaut 1.5 pour se1 et 2.2 pour se2, va dans le même sens que les incubations de 1977 qui ont favorisé la minéralisation de NO₃- vis-à-vis de NH₄⁺, surtout pour cette série "se2". Bien qu'en principe le rapport entre nombre de germes momentanés et activité microbienne, mesurée ici par le degré de minéralisation nette fig. 40b, soit évidemment loin d'être direct, même au-delà de leurs fluctuations propres au cours du temps (cf. DUCHAUFOUR e.a. 1979:129). Dans le sol sur carbonates par contre, les ammonifiantes tendent à surpasser les nitrifiantes en nombre, bien que la minéralisation nette aille clairement au compte des nitrifiantes. Alors que le sol sur silicates compte ici 20 fois moins de bactéries ammonifiantes que de nitrifiantes, et même 20 fois moins d'ammonifiantes que sur carbonates, bien que la minéralisation nette sur silicates aille en général plutôt en faveur d'une teneur en NH₄⁺ minérale prévalente. Le pH vers 5.0 de ce sol n'y est sans doute pas étranger. Faut-il envisager d'autres sources d'ammonification (voir ci-dessus)?

*

Cette divergence entre densité d'organismes et activité microbienne s'avère encore plus marquée sur les sols alpins carbonatés de LABROUE (e.a. 1977:68, 69) : la microflore ammonifiante y est environ 10⁴ fois plus nombreuse que la nitrifiante, alors que la minéralisation nette y va clairement au compte de la nitrification. Ces auteurs suggèrent tout au plus un lien assez étroit entre le nombre de germes nitrifiants et l'activité nitrificatrice brute. Notons que leurs densités de nitrifiants, vers 10³ germes/g de terre au maximum au mois d'août, sont plus de 10 fois inférieures à celles de Davos et leurs densités d'ammonifiantes 10² à 10⁴ supérieures (altitude des prises 300 m plus haut qu'à Davos).

Pour d'autres serpentines, on ne peut guère se faire d'idée du rapport ni/am. L'ammonification sur une serpentine de Bosnie-Herzégovine n'atteint que 1/10 de celle sur une dolomite adjacente - Davos 1/7 à 1/4 - (TESIC e.a. 1967 et RITTER 1970 ex PROCTOR e.a. 1975:340). LIPMAN (1926:317, Orégon) n'enregistre aucune nitrification, même après 2 mois d'incubation, bien qu'il pense avoir vu des bactéries nitrifiantes au microscope. PROCTOR (e.a. 1975:339) citent LLOYD qui aurait isolé des bactéries nitrifiantes, actives, sur une serpentine riche en Ni en Rhodésie; et SEDOVA (1958) selon qui des concentrations de Cr dépassant 1 ppm du sol interféreraient avec la nitrification.

*

Les plantes quant à elles peuvent se nourrir de NH₄⁺ et NO₃⁻ : on peut se questionner sur le régime nutritif prévalant sur serpentine, sur les avantages et inconvénients de l'un et l'autre et sur leur répercussion sur la productivité. Les résultats de Davos sont assez contradictoires : d'une part les sols de serpentine suggèrent plutôt une disponibilité prévalente en NO₃⁻ à partir des mesures de minéralisation de l'azote, c.-à-d. une situation comparable à celle des sols calcimagnésiens; d'autre part les plantes de serpentine suggèrent une alimentation azotée sous forme NH₄⁺, vu leur valeur théorique moyenne en acides organiques surprenamment basse, c.-à-d. une situation plutôt comparable à celle sur silicates (cf p. 194).

Généralement l'utilisation par les plantes de NO_3^- est favorisée en milieu acide, celle de NH_4^+ en milieu basique, mais cela dépend et des espèces, et du stade vital (LEMEE 1978:117; BAUMEISTER 1978:94). En culture hydroponique l'absorption des autres ions de même signe est plutôt inhibée, de signe contraire favorisée (KINZEL 1982:286), ce qui signifierait sur serpentine que NH_4^+ concurrencerait l'absorption de K^+ , NO_3^- celle de PO_4 . Ni l'une, ni l'autre version ne ressort explicitement des résultats de Davos considérés au niveau des moyennes, p. 170. Dans une première étape l'absorption de NO_3^- soluble dans la solution du sol par rapport à l'absorption de NH_4^+ lié au complexe absorbant pourrait avoir certains avantages. Solubilité du NO_3^- qui peut aisément entraîner des pertes d'azote dans le sol par lixiviation. Par contre NO_3^- assimilé par les plantes doit d'abord y être réduit en NH_4^+ par l'intermédiaire de deux enzymes supplémentaires requérant Mo et Fe (BAUMEISTER 1978:93sq,115) et nécessite la synthèse d'acides organiques pour contrebalancer le déplacement du pH (KINZEL id). Inverse de la nitrification, cette réaction est endergonique (fig. 43). La rapidité et l'intensité de cette réduction dépendent d'abord des espèces, puis des conditions de station, entre autres des sources d'énergie nécessitées (BAUMEISTER 1978:102,115). Cependant NO_3^- peut compter à son avantage le fait d'être stockable dans la plante alors que NH_4^+ doit être métabolisé tout de suite; de contribuer éventuellement à réduire la photorespiration, c.-à-d. à augmenter la productivité des plantes C3; et de favoriser la croissance des racines, voir p. 191 à 199 (KINZEL 1982:286,287,292).

Ainsi ELLENBERG (1964:85) note laconiquement que les différences dans le métabolisme de l'azote dans les sols sont peut-être plus importantes pour la répartition des espèces dans la nature que ne l'est le degré d'acidité du sol qui, plus qu'un facteur décisif direct, est plutôt un symptôme de l'état du sol. Nous avons vu que dans les sols à mull, la minéralisation livre surtout du NO_3^- (STRASBURGER e.a. 1983:977). Or les espèces du mull peuvent s'alimenter à partir des deux formes d'azote (DUCHAUFOR e.a. 1979:393). Quant à nos sols de serpentine de Davos, la minéralisation tend bien à livrer plus de NO_3^- , mais NH_4^+ est également représenté, plus ou moins selon les stations et la saison. On peut se demander si la présence simultanée d'espèces acidicoles et basicoles est en lien avec la présence des deux formes d'azote. Et en guise de conclusion on peut encore se demander si, contrairement à beaucoup d'écosystèmes (ELLENBERG 1964:8), sur serpentine ce n'est pas tant N qui est un facteur limitant, mais plutôt les éléments nutritifs seulement livrables par la roche, ainsi que leurs rapports défavorables.

Il serait également intéressant d'évaluer combien la nitrification contribue à l'acidification du sol qui est liée à la pédogénèse sur serpentine (cf. p. 103) : on sait en effet que la nitrification, du fait qu'elle libère des ions H^+ , peut être liée à une acidification substantielle du sol, surtout si le pouvoir tampon du sol est faible (BAUMEISTER e.a. 1978:28; DOMMERGUES e.a. 1970:349). Sur serpentine cependant, le Mg libéré et échangeable en quantités importantes peut s'opposer assez efficacement à l'acidification. Citons encore LEBEDEVA e.a. 1978 ex BROOKS 1987:28, qui ont montré expérimentalement que les bactéries nitrifiantes seraient à même de jouer un rôle important dans l'altération des serpentinites, rendant certains éléments mobiles, surtout le Mg, et participant à la formation de la croûte d'altération des pierres (cf p. 118).

4.3 Profils

4.3.1 Profils pédologiques et types de sols

Les sols sur serpentine alpine, illustrés par les profils fig. 44, se recrutent dans la séquence

lithosol → ranker alpin → ranker alpin brunifié → (sol brun(acide)subalpin)

c'est-à-dire des sols initiaux minéraux bruts de type (A) C jusqu'à des sols (peu) évolués par altération, de type A (B) C, où le squelette joue toujours un rôle important.

Il n'y a pas de lombrics et seulement quelques rares collemboles.

Distribution. Les sols bruts sont de loin les plus fréquents, en particulier dans les pentes et lieux instables, et à l'étage alpin supérieur quasi les seuls. Les ranker apparaissent dès qu'une certaine densité de végétation, si ce n'est une certaine stabilité du sol, garantissent un peu d'humus. Les ranker purs restent rares, car la libération du fer qui trahit la brunification semble débiter très rapidement. Les ranker brunifiés restent très locaux, principalement liés à des situations géomorphologiques favorables, p.ex. grande stabilité, tendance colluviale, piégeage et accumulation d'une fraction fine réduisant la proportion du squelette à moins de 50 % (dans les 20 à 50 premiers cm). On trouve ainsi des ranker brunifiés isolés jusqu'à 2450 m (cf profil 6, 105 TE). Ils sont surtout logés dans le fond de la large vallée du Meierhofertälli, vers le pied du Totalphorn, vallée sans doute conditionnée par l'érosion glaciaire et les moraines de fond; et sur les replats vers 2280 m à l'E du Totalphorn, sous les gazons et landines.

Mais la différenciation du sol n'est parallèle à celle de la végétation que dans les grandes lignes. Sur substrat silicaté alpin MUELLER 1983:68 est arrivé à une conclusion semblable.

*

Humification. Les sols initiaux sont assez superficiels, discontinus, occupent de faibles surfaces entre un squelette toujours prédominant. Le recouvrement végétal est le plus souvent trop faible pour qu'il puisse y avoir dépôt de litière en surface. Elle est le plus souvent déjà entraînée par les intempéries.

Dans les sols plus évolués, tout aussi disséminés, la litière est plutôt mieux décomposée : l'humification va du moder jusqu'au mull, comme le confirment les analyses d'azote, et cela entre autres grâce au pH élevé, à l'intensité des radiations et à la litière de pelouse plutôt améliorante, à C/N favorable (discussion p. 86sq). Néanmoins, en accord avec la faible biomasse produite sur serpentine, il y a plutôt moins de matière organique dans ces profils que dans les ranker d'autres roches silicatées et d'autres climats (cf DUCHAUFOR e.a. 1977: 208). L'épaisseur de A1 et sa teneur en matière organique sont des plus diverses et changent rapidement suivant les microsites. Il n'y a pas de passage d'horizon brutal car l'horizon C recèle toutes les fractions granulométriques.

Sous les buissons nains et pins rampants à forte strate de lichens, les profils restent du même type, mais il peut s'accumuler jusqu'à 5 cm d'humus brut à pHA descendant jusqu'à 4. Pour l'étage subalpin JUCHLER 1988:135 estime la teneur du sol en humus à 40 kg/m² sur serpentine, qu'il confronte aux 47 kg/m² de LARCHER 1980 sous lande à buissons nains.

Brunification. Morphologiquement l'horizon (B) peut être à peine visible jusqu'à bien formé, sans trace de liseré cendré pouvant indiquer l'évolution d'un ranker alpin vers un podzol nain (il n'a pas de quartz dans la serpentine). Cette évolution dans le sens d'une brunification se poursuit jusqu'à l'étage subalpin à Davos : ainsi STICHER e.a. 1986:284 décrivent-ils des sols bruns (à une exception près p. 125).

En principe la brunification a lieu en milieu aéré si les teneurs en Fe et Al libres actifs (non analysés à Davos) et en argile dépassent un certain seuil; à savoir si la teneur en Fe actif lié aux argiles est supérieure à .5 % Fe libre; et la teneur en argiles supérieure à 7-8 %, DUCHAUFOR e.a. 1977:139. Dans les lithosols alpins sur serpentine du Val d'Aoste, VERGER 1979:134 a effectivement trouvé les quantités considérables de 1. % de Fe et .1 % d'Al libres, les teneurs de la roche comportant en moyenne 6 % Fe₂O₃ et 3 % Al₂O₃ (Davos 8 % Fe₂O₃ et 3 % Al₂O₃); et dans un sol brun acide subalpin de Davos STICHER e.a. 1986:282 ont trouvé 2.7 à 5.4 % de Fe libre dans l'horizon d'altération (B), voir aussi JUCHLER 1988:50sq; comme BERRE e.a. 1974:138,143, dans un sol brun eutrophe d'une serpentine du Limousin, 15 % de Fe₂O₃ libre en A11 et A12. Quant à l'argile, les sols de Davos décrits comme brunifiés révèlent 10 à 25 % d'argile. Des

Légende des profils : Définition des types de sols

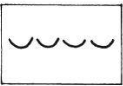

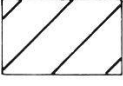


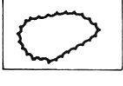
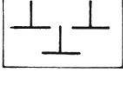


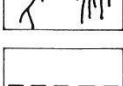
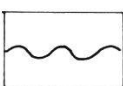
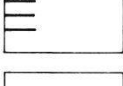
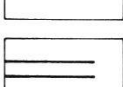



- horizons AO : (=O) de surface, à matière organique à structure originelle modifiée ou détruite, >30 % de matière organique.
 A1 : (=Ah) de surface, à matière organique et minérale mixte (mull), < 30 % de matière organique.
 A2 : (=Ae ou E) dit éluvial, pauvre en matière organique, souvent lessivé en argiles et sesquioxydes, de couleur claire.
 (B) : (=Bv) d'altération (ou structural), différant de la roche-mère par son degré d'altération plus fort; brunifié, c'est-à-dire riche en sesquioxydes et en argiles.
 C : matériau originel aux dépens duquel est formé (B).
- lithosol : sol minéral brut à profil (A) C. Sol peu différencié sur roche dure, à matière organique non transformée directement sur C. Ici admis sans horizon continu de A1. Apparenté aux ranker. (DUCHAUFOR e.a. 1977:172,197).
- ranker alpin : sol à profil A C sur roche silicatée, peu différencié, d'habitude très humifère, riche en minéraux altérables, désaturé par lixiviation des cations (caractéristique de climats humides) et même acide. (O.c.: 172,202sq).
- ranker alpin brunifié : sol à profil A1 (B) C, évolué par altération, aéré. Ranker par l'importance du squelette et de la fraction minérale et par le climat de montagne. Brunifié vu l'horizon d'altération (B), coloré en brun ou en rouille par la libération du fer et riche en argiles fines, (B) cependant peu différencié et peu épais. Sous mull-moder. Sol en principe à saturation très variable, ici type mésotrophe. (O.c.:206,301).

Classification				
internationale des horizons DUCHAUFOR e.a. 1977:178sq	C	A1 C	A1 (B) C	AO A2 (B) C
écologique française o.c.:187sq	lithosol*	ranker alpin	ranker alpin brunifié	sol brun acide
anciennement a.c. 1960:220	ranker brut	ranker à moder ranker à mull	sol alpin humique	sol brun acide
anglaise BIRSE 1982:161 AVERY 1980	magnesian skeletal soil	alpine magnesian soil	alpine brown magnesian soil	brown magnesian soil
allemande/suisse PALLMANN-KUBIENA BACH 1976:135sq	Skelett-, Gesteins-rohboden	Humusgesteinsboden	alpine Braunerde	saure Braunerde
de la FAO 1974 BACH 1976:157	lithosol régosol	ranker	(dystric) cambisol	dystric cambisol
américaine USA 1975 DUCHAUFOR c.:181sq	orthent	orthent	umbrept-ochrept	dystric ochrept

* avec l'attribut serpentinique, ultramafitique, ferro/hyper/magnésien etc.

Légende des profils de la fig. 44

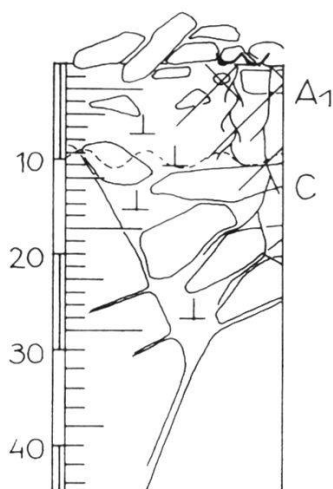
Legend to the profiles of fig. 44

	litière non décomposée (humus brut), lâche, superposée au sol minéral	non decomposed litter (raw humus), loose, super- imposed on the mineral soil
	matière organique moyennement transformée (moder), peu mélangée au sol minéral	moderately transformed organic matter (moder), little mixed with the mineral soil
	mélange de matière minérale et organique assez bien décomposée (mull), peu humeux (C < 2 %)	mixed mineral and organic matter, fairly well decomposed (mull), little humic (C < 2 %)
	mélange de matière minérale et organique assez bien décomposée (mull), assez humeux (C > 5 %)	mixed mineral and organic matter, fairly well decomposed (mull), fairly humic (C > 5 %)
	squelette (> 2 cm), pierres fraîches, non ou peu altérées chimiquement en surface	skeleton (> 2 cm), raw stones non or little altered chemically on surface
	squelette (> 2 cm), pierres altérées chimiquement en surface	skeleton (> 2 cm), stones chemically altered on surface
	roche-mère en cours d'altération physique (gravier et arène serpentiniques)	mother-rock in process of physical alteration (serpentine gravel and sand)
	brunification (libération de fer ou sesquioxydes) jugée d'après la couleur brune à rousse (p. 54)	brunification (liberation of iron or sesquioxides) judged by the ochre to reddish colour
	taches de rouille	rust spots
	racines vivantes	living roots
	limite d'horizon diffuse	diffuse horizon limit
	limite d'horizon irrégulière	irregular horizon limit
	texture sableuse de la terre fine (< 2 mm)	sand-textured fine earth (< 2 mm)
	texture limoneuse de la terre fine (< 2 mm)	silt-textured fine earth (< 2 mm)
	texture argileuse de la terre fine (< 2 mm)	clay-textured fine earth (< 2 mm)
	lentille de sable	sand lens
	lit de sable sous pierres	sand bed under stones
	dépôt argileux à la surface des pierres	clay deposit on stones

DESCRIPTION DES PROFILS DE SOLS SUR SERPENTINE ALPINE PRES DE DAVOS

1

1 LITHOSOL ALPIN (10 WJ)



2600 m, SWW, pente 50 %, sous l'arête
végétation d'éboulis de crêtes stables et secs (Ia)
recouvrement végétal 10 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 0:20:20:50 % en surface
altération faible : 1

A1 (0 - 10 cm)

couleur : brun-gris foncé à l'état humide
rare moder et mull près des plantes
pHA 7.3
squelette* 50 %, gravier et petits cailloux (très) abondants très
peu d'argile et de limon
pas de structure
limite inférieure diffuse, surtout granulométrique

C (> 10 cm)

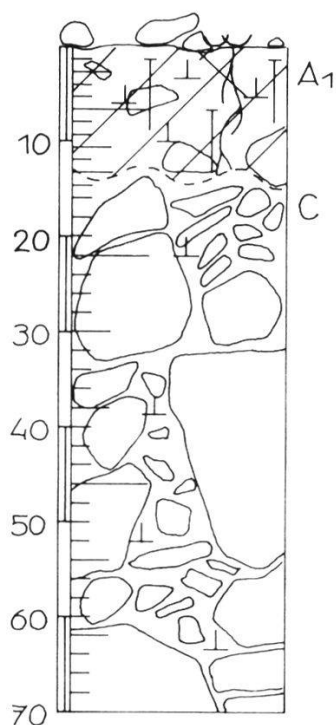
couleur : brun-gris foncé
squelette 90 %

Sol extrêmement perméable. Rochers dépassant altérés chimiquement,
tout le matériau d'éboulis non.

*squelette : ici >2 cm (cf p. 54)

2

2 RANKER ALPIN (51 WJ)



2570 m, S, pente 10 %, replat dans un flanc
végétation de replats de gravier frais (Id)
recouvrement végétal 5 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 30:30:20:15 % en surface
altération moyenne : 2

A1 (0 - 14 cm)

couleur : brun à ocre à l'état humide
peu de matière organique, du type mull, C < 1. %
pHA 6.8
squelette 40 %
pas de structure

C (> 14 cm)

couleur : passage du brun au gris de haut en bas du profil
squelette 70 %, beaucoup de sable, puis de gravier en bas.

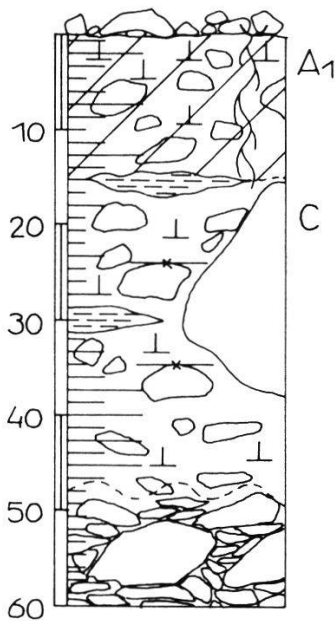
Avec coulées de gravier en surface.

Fig. 44

Description des profils de sols sur serpentine.
Description of the soil profiles on serpentine.

3

3 RANKER ALPIN (67 TS)



2490 m, SSE, pente 15 %, flanc d'un faible ensemencement
végétation des combes à neige pouvant s'assécher (IIb)
recouvrement végétal 5 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 15:55:20:5 % en surface
altération moyenne : 2

A1 (0 - 15 cm)

couleur : brun-gris moyen à l'état humide
peu de matière organique, du type mull, C = .92 %, C/N = 26.
pHA 6.9 à 5 cm quasi neutre, 7.4 à 10 cm, mais étonnamment désaturé V = 38. % à 5 cm, 49. % à 10 cm
squelette 95 %, terre fine à proportions de
sable:limon:argile = 72:19:9 %
structure à tendance granuleuse

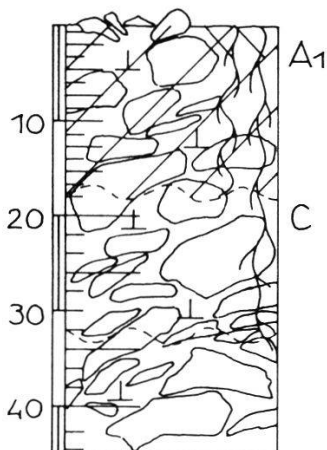
C (> 15 cm)

couleur : passage du brun-gris moyen au bleu-gris clair de la base
non altérée
pHA 7. à 7.3, irrégulier, selon les couches
dépôts à granulométrie différenciée : bancs de sable et vers 50 cm
lit de cailloux altérés chimiquement, avec limon très clair formant une couche dure
squelette 95 %

Ce profil a été creusé dans le barrage naturel qui retient le Totalpsee. Il est constitué de dépôts à granulométrie différenciée, tels bancs de sable, etc. Les pierres y sont d'autant moins érodées que plus petites. Des dépôts d'argile couronnent certaines pierres plus grosses.

4

4 RANKER ALPIN (84 WJ)



2610 m, crête
végétation : semi-gazon sur crête (IIIb)
recouvrement végétal 5 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 20:30:30:15 % en surface
altération nulle : 0

A1 (0 - 17 cm)

couleur : gris moyen à l'état humide
peu de matière organique du type mull, C ≈ 1.0 %
pHA 6.9
squelette 70 %, type de serpentine feuilletée, luisante, quelques
rares pierres de silice
pas de structure

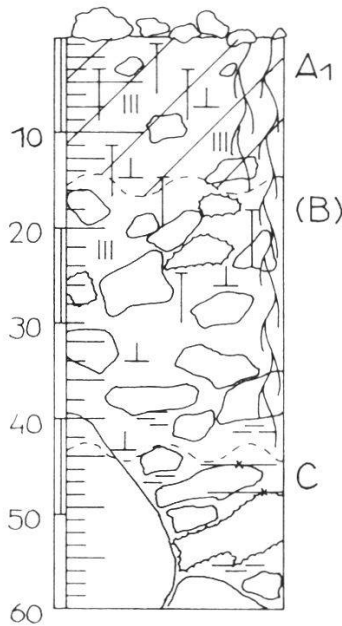
C (> 17 cm)

couleur : bleu-gris moyen
très mouillé en dessous de 30 cm
squelette 95 %, serpentine très feuilletée
(voisine d'une zone de contact vers silicates).

5

5 RANKER ALPIN BRUNIFIE (74 MT)

2440 m, SSE, pente 10 %, fond de vallée large
végétation : semi-gazon des replats en fond de vallée (IIIc)
recouvrement végétal 5 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 10:50:25:10 % en surface
altération moyenne : 2



A1 (0 - 15 cm)

couleur : brun chaud à l'état humide
peu de matière organique, du type mull, C = .80 %, C/N = 18.
neutre, pH_A = 7.0, mais étonnamment désaturé, V = 35 %
squelette 5 %, terre fine à proportions de
sable:limon:argile = 60:20:14 %
pierres à taches de rouille, s'altérant en matériau très fin
structure grumeleuse bonne au sommet
limite inférieure transitoire avec (B) par la couleur de la frac-
tion fine, limite claire par la granulométrie

(B) (15 - 43 cm)

couleur : brun-gris, passage en transition
légèrement plus acide que A1, pH_A = 6.8, moins désaturé, V = 60 %
squelette 50 %, pierres arrondies, s'altérant parfois en matériau
rouillé
structure à tendance granuleuse
lit de sable sous les pierres à la limite vers C
limite vers C surtout granulométrique

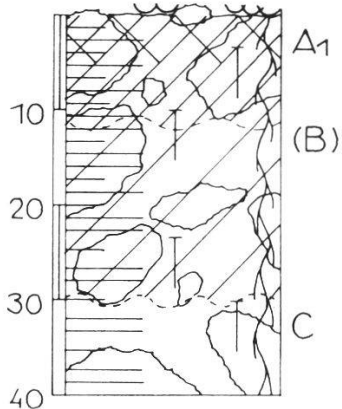
C (> 43 cm)

couleur : bleu; pH_A 6.8, V = 54 %
squelette 80 %, pierres en partie altérées, couronnées d'un dépôt
d'argile et reposant sur un lit de sable. Types de serpentine
mélangée, év. même avec ophicalcites (moraine ?). Squelette non
altéré plus en profondeur.

6

6 RANKER ALPIN BRUNIFIE (105 TE)

2450 m, SSE, pente 30 %, haut d'un flanc
végétation : landine herbeuse (Va)
recouvrement végétal 30 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 5:5:30:30 % en surface
altération forte : 4



A1 (0 - 11 cm)

couleur : brun sombre à l'état humide
passablement de matière organique bien incorporée, du type mull,
néanmoins un peu moins décomposée en surface,
C = 7. %, C/N = 13. %
pH_A = 6.1, saturation assez élevée V = 75 %
squelette 40 %, pierres à surface fortement altérée, terre fine à
proportions de sable:limon:argile = 38:39:23 %
structure grumeleuse-granuleuse

(B) (11 - 30 cm)

couleur : brun-ocre, passage en transition
squelette 40 %
structure granuleuse

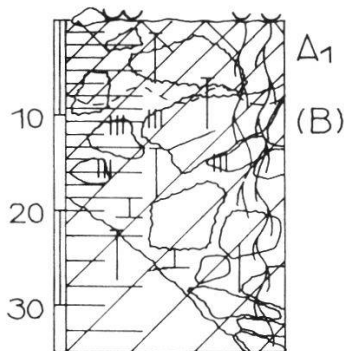
C (> 30 cm)

couleur : ocre
squelette 50 %

Profil en situation légèrement colluviale

7

7 RANKER ALPIN BRUNIFIE (125 TA)



2250 m, NE, pente 40 %, bord d'un replat
végétation : gazon graveleux un peu frais (VIIa)
recouvrement végétal 80 %, en petites terrasses
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 5:5:5:5 % en surface
altération assez forte : 3

A1 (0 - 8 cm)

couleur : brun moyen à l'état humide
passablement de matière organique du type mull, en partie moder,
C = 8.4, C/N = 16.
pHA = 5.8, saturation V : 50 %
squelette 40 %, terre fine à sable:limon:argile = 40:46:14 %
pierres à cassure très noire et à texture plus massive
structure grumeleuse à quasi pâteuse

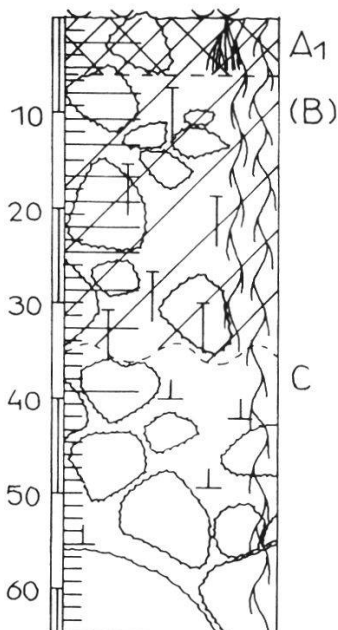
(B) (> 8 cm)

couleur : passe d'un brun moyen à un brun encore plus foncé, en
bas du profil quelque peu rougeâtre
passablement de matière organique C = 7.3 % à 10 cm, encore 2.4 %
à 35 cm, et C/N = 16. comme en A1
pHA = 5.9 à 10 cm, 6.7 à 35 cm, désaturation d'abord plus forte
qu'en A1, V = 41. % à 10 cm puis 63 % à 35 cm
squelette augmentant de 50 à 80 % vers le bas. Mélange de pierres
différentes, très friables, dont certaines se désagrègent en ar-
gile rouillée quand on les presse, de couleur jaune, ocre jusqu'à
rouge foncé

Profil dans une région avoisinant des ophicalcites vertes. Quoiqu'absentes du squelette de surface, elles semblent apparaître, altérées, dans l'horizon (B). La végétation trahit cette influence par la présence de *Sesleria coerulea*, *Galium anisophyllum* et *Pinguicula alpina* (cf p. 132).

8

8 RANKER ALPIN BRUNIFIE (133 MT)



2350 m, SSE, pente 15 %, bas de pente stable
végétation : gazon humeux nettement frais (VIIb)
recouvrement végétal 85 %
terre fine:gravier:cailloux:rochers = 10:0:5:0 % en surface
altération assez forte : 3

A1 (0 - 7 cm)

couleur : brun noirâtre à l'état humide
passablement de matière organique bien décomposée, du type mull,
en surface plutôt moder, C = 8.9 %, C/N = 11 %
pHA = 6.4, saturation V = 48 %
squelette 30 %, terre fine assez riche en argile à proportions de
sable:limon:argile = 43:32:25 %
structure grumeleuse bonne

(B) (7 - 35 cm)

couleur : brun virant à l'ocre foncé vers le bas
passablement de matière organique
pHA et saturation à peine en augmentation
squelette augmentant régulièrement vers le bas
structure grumeleuse

C (> 35 cm)

couleur : brun-gris de plus en plus gris
peu de matière organique, à 60 cm C = .52, C/N = 23.
à la base du profil creusé pHA = 6.9, saturation V = 63 %
squelette jusqu'à 70 %, bien drainé

Profil situé au pied du Totalphorn, à tendance colluviale par ce fait. Les pierres du squelette sont toutes du même type de serpentine massive, à surface de moins en moins altérée en descendant le long du profil, mais toujours très rondes.

teneurs conjointes en fer et argile élevées garantissent par ailleurs une bonne humification et le mull est la forme typique des sols brunifiés (DUCHAUFOR 1977:48,99,139). Discussion brunification/podzolisation p. 122sq.

L'attribut mésotrophe pour les sols serpentiniques alpins de Davos est nettement suggéré par la désaturation V entre 30 et 60 % (mesuré à pH 7), même pour les lithosols et même au vu des horizons inférieurs, en partie (B) où la saturation tend à augmenter, fig. 45, ainsi que par la faible acidification en surface, au plus jusqu'à $pH_C \gg 5$ (définitions selon DUCHAUFOR e.a. 1977:301). Notons que VERGER décrit sur serpentine en Val d'Aoste à l'étage alpin (1977: 137) des sols "très eutrophes", saturés; à l'étage montagnard sylvicole à climat plus sec (1982:60) des sols bruns méso- à eutrophes, à $V > 50$ %. A Davos, à l'étage sub-alpin, la tendance va vers des sols bruns acides, à V diminuant dans les horizons (B) (CAFLISCH 1974:tab.3). Il se peut que la pluviosité relativement élevée à Davos favorise la lixiviation, d'où une désaturation plus accentuée.

*

Enracinement. Il est loin de se limiter à l'horizon A1 : ce n'est pas rare de trouver encore à plus de 50 cm de profondeur des réseaux lâches de fines racines, d'ailleurs même sous des végétations très clairsemées et parfois surprenamment loin des plantes. Plus particulièrement, les colonisatrices des lieux instables du type *Silene Willdenowii*, *Minuartia verna* peuvent être véritablement ancrées par de très longues racines, assez élastiques. Quant aux graminoides, d'autant plus quand elles croissent seules, leurs racines sont remarquablement touffues et très importantes par rapport aux parties aériennes (la comparaison avec d'autres substrats provient d'innombrables plantes déterrées pour des cultures comparées). Cette proportion des parties souterraines/aériennes élevée est une caractéristique fréquemment observée sur les serpentines (voir p. 191 et 230). Elle semble même être génétiquement fixée, p.ex. chez *Silene Willdenowii* de Davos (SCHOOOP et EGGER 1980:64).

*

Altération. Un aspect intéressant mais peu clair est le rapport entre le type d'altération des pierres et la morphologie du sol.

Les sols à serpentine "bleue" semblent résulter d'une désagrégation physique prépondérante liée à un état instable de la géomorphologie. Cela semble d'ailleurs souvent correspondre à un caractère plus phyllitique et plus inhomogène de la roche elle-même. Ces sols sont riches en gravier et fractions voisines, le plus souvent à cassure fraîche : tels les sols sur le flanc E du Totalphorn dont la base non encore stabilisée favorise l'érosion de toute la pente; tels aussi les flancs situés sous les arêtes de roche affleurante qui se désagrègent sous l'effet du gel et alimentent les éboulis.

Par contre les sols "roux" semblent surtout marqués par l'altération chimique, avec son cortège de couleurs de l'ocre au brun lié à la libération du fer. Ces sols sont souvent liés à une sorte de serpentine "noire" à texture plus massive et homogène et les pierres y sont souvent couvertes d'une croûte d'altération parfois très rugueuse, les divers minéraux s'altérant différenciellement (p. 117). Ce type d'altération a lieu avant tout là où pierres et roches, ne serait-ce que par leur taille, ont une assise plus ferme : c'est-à-dire sur le faite des arêtes de roche affleurante; au pied des éboulis exerçant comme une sélection sur la grandeur des pierres, les plus grosses s'accumulant en bas; dans les anciennes moraines latérales; dans bien des replats et en fond de vallée. La granulométrie est ici caractérisée par une fraction de terre fine et un squelette grossier abondant, aux dépens des graviers et petits cailloux. L'altération est discutée p. 113sq.

La distribution granulométrique en surface, indiquée dans l'en-tête des profils, peut s'écarter passablement de celle des horizons inférieurs. Ainsi p.ex. les éléments fins, s'ils ne sont pas retenus par une couverture végétale suffisante, ont tendance à migrer sous les pierres en situation colluviale, vraisemblablement surtout à la suite du travail du gel.

Indépendamment de l'état d'altération chimique superficielle des pierres en surface, tous les profils marquent une diminution de celle-ci vers une serpentine de plus en plus fraîche et "bleue", généralement au maximum sur 80 cm de profondeur. Ainsi le gradient de développement des sols qu'on distingue en surface a un correspondant fidèle à l'envers dans le profil des sols. Cela ressort également au niveau des teneurs chimiques, comme l'illustrent les graphiques des similitudes entre ces teneurs, à l'exemple d'une ranker brunifié, fig. 36-1 à 3 p. 75sq. Tout cela souligne en fait le caractère peu évolué des types de sols serpentiniques alpins. (L'altération et la pédogénèse des serpentines sont discutées p. 113sq.).

4.3.2 Profils pédochimiques

Comme il ressort des profils pédochimiques 3, 5, 8 de la fig. 45, dans les sols plus développés sur serpentine alpine à Davos (légende pédochimique annexe 1) :

- C N P K Ca Mg S T tendent à diminuer du haut en bas du profil, comme ils diminuent des sols développés en direction des sols bruts (fig. 33 p. 69 et fig. 36-1 à 3 p. 75sq);
- pH C/N Mg/Ca V tendent à augmenter du haut en bas du profil, comme ils augmentent des sols développés en direction des sols bruts.

Notons que le profil du ranker alpin brunifié 7 (relevé 125) trahit l'influence des proches opicalcites vertes et à veines de calcite par des teneurs plus élevées en Ca Mg S T (valeurs éventuellement surestimées pour des raisons méthodiques p. 44).

Ces distributions simples témoignent de la différenciation relativement discrète des horizons. Elles reflètent une accumulation biologique en surface, C N P K Ca étant soit absents soit en faibles quantités dans la roche serpentine. La capacité d'échange cationique T, qui se comporte comme C et N, y est sans doute surtout déterminée par la matière organique (cf p. 70).

pH. Les sols sur serpentine alpine sont tout au plus faiblement acides, pHA vaut entre 6 et 7.5, sauf s'il y a accumulation d'humus brut où il descend jusqu'à 4.5 (liens entre pHA et pH_C p. 41sq). Ainsi les sols bruts sont à peine moins basiques que sur carbonates : maximum sur serpentine pHA 7.65, sur carbonates 7.90. L'acidification qui accompagne le développement des sols comporte presque 2 unités de pH et reste comparable à celle qui accompagne la décarbonatation sur carbonates, alors que sur les autres matériaux non carbonatés le pH descend généralement très rapidement (FITZE 1982:81). Il semble que l'acidification des horizons encore largement minéraux soit due au pouvoir tampon de CO₂ (p. 41) et à la lixiviation préférentielle de Mg qui peut lui être liée (p. 118). La mobilité des cations est Na > K > Mg > Ca (DUCHAUFOR e.a. 1977:77). Il se peut que la nitrification joue également un rôle (p. 94). En fait, au-dessus de pH 5.5, le pH est pratiquement réglé par le système eau-CO₂. Le CO₂ de l'atmosphère du sol, d'origine essentiellement biologique, prend une influence prépondérante sur le pouvoir tampon et le pH du milieu. Le pH s'élève dans les horizons minéraux profonds là où précisément les ressources en CO₂ s'épuisent (DUCHAUFOR e.a. 1979:357,359). Ainsi STICHER e.a. 1986:286 mesurent un pHA de la roche serpentine moulue quelque peu supérieur à 8, alors que dans l'horizon d'altération B des étages subalpins et alpins sur serpentine à Davos, où les ions Mg sont lixiviés par les eaux de percolation, le pH CaCl₂ s'équilibre entre 5.3 et 5.5, c.-à-d. dans le domaine tampon de CO₂/HCO₃⁻. La capacité de neutralisation par les produits d'altération continuellement livrés est assez forte pour empêcher une acidification ultérieure même sous des humus bruts parfois très acides, comme à l'étage subalpin (cf STICHER 1978:3 et p. 116).

L'accumulation biologique, en particulier de Ca, dans les horizons supérieurs sur serpentine se retrouve presque dans tous les sols serpentiniques plus développés des zones froides et tempérées. Elle s'accompagne alors d'une améliora-

tion du rapport Ca/Mg (voir p.ex. PICHI 1948:35; BERRE e.a. 1974:138; CAFLISCH 1974:tab.3; KOENIGS e.a. 1982:5; RABENHORST e.a. 1982:611; VERGER 1982:61; STICHER e.a. 1986:282). Plus généralement les mull, forme d'humus de ces sols plus développés sur serpentine, sont connus comme ayant des cycles biologiques efficaces et caractérisés par une forte activité biologique, avec mobilisation des cations. Celle-ci conduit entre autres pour le Ca à un enrichissement marqué des horizons humifères de surface lorsque le matériau de départ est pauvre en ces éléments, suggérant une évolution convergente des humus (p. 89) et cela par

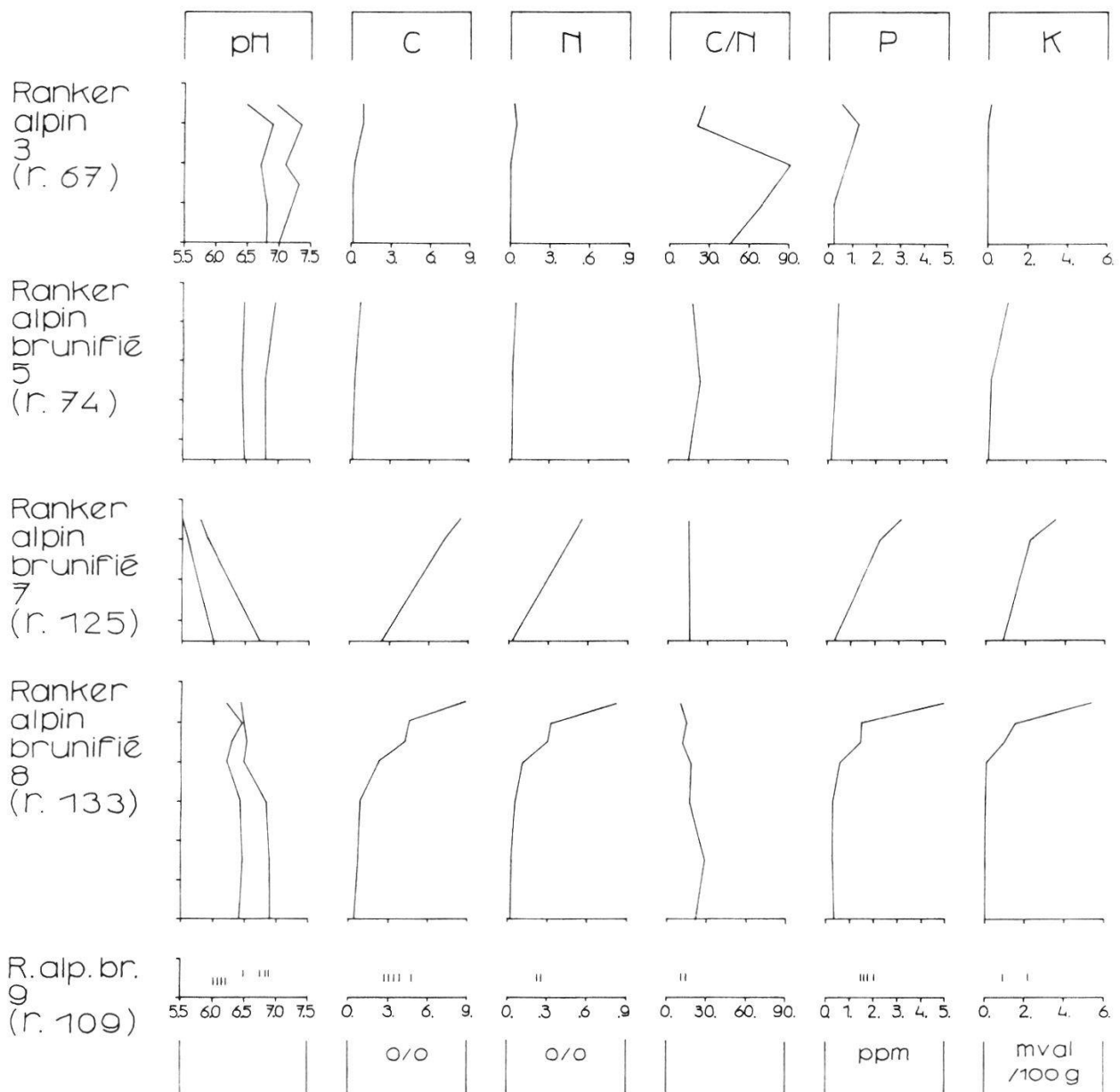


Fig. 45

Profils pédochimiques de ranker sur serpentine (légende pédochimique annexe 1). Les no sont ceux des profils décrits p. 98sq et entre parenthèse ceux des relevés de végétation (cf p. 128).

No 7 est influencé par des ophicalcites (voir texte)

No 9 résume 6 échantillons d'un même sol (voir p. 45).

effet indirect : dans les mull les complexes originaires des litières sont rapidement insolubilisés, mais sous formes plus ou moins facilement biodégradables qui libèrent Ca sous forme échangeable à un rythme élevé; le cycle du Mg serait semblable à celui du Ca, mais plus rapide encore et Mg plus mobile (DUCHAUFOR e.a. 1977:97).

Profils pédochimiques ultérieurs sur serpentine des zones froides à tempérées chez BIRSE 1982:144; DUVIGNEAUD 1966:304; JUCHLER 1988; KRAPPENBAUER 1967:214; MENEZES 1969:123sq; RAGG e.a. 1964:127; WILSON e.a. 1978:184.

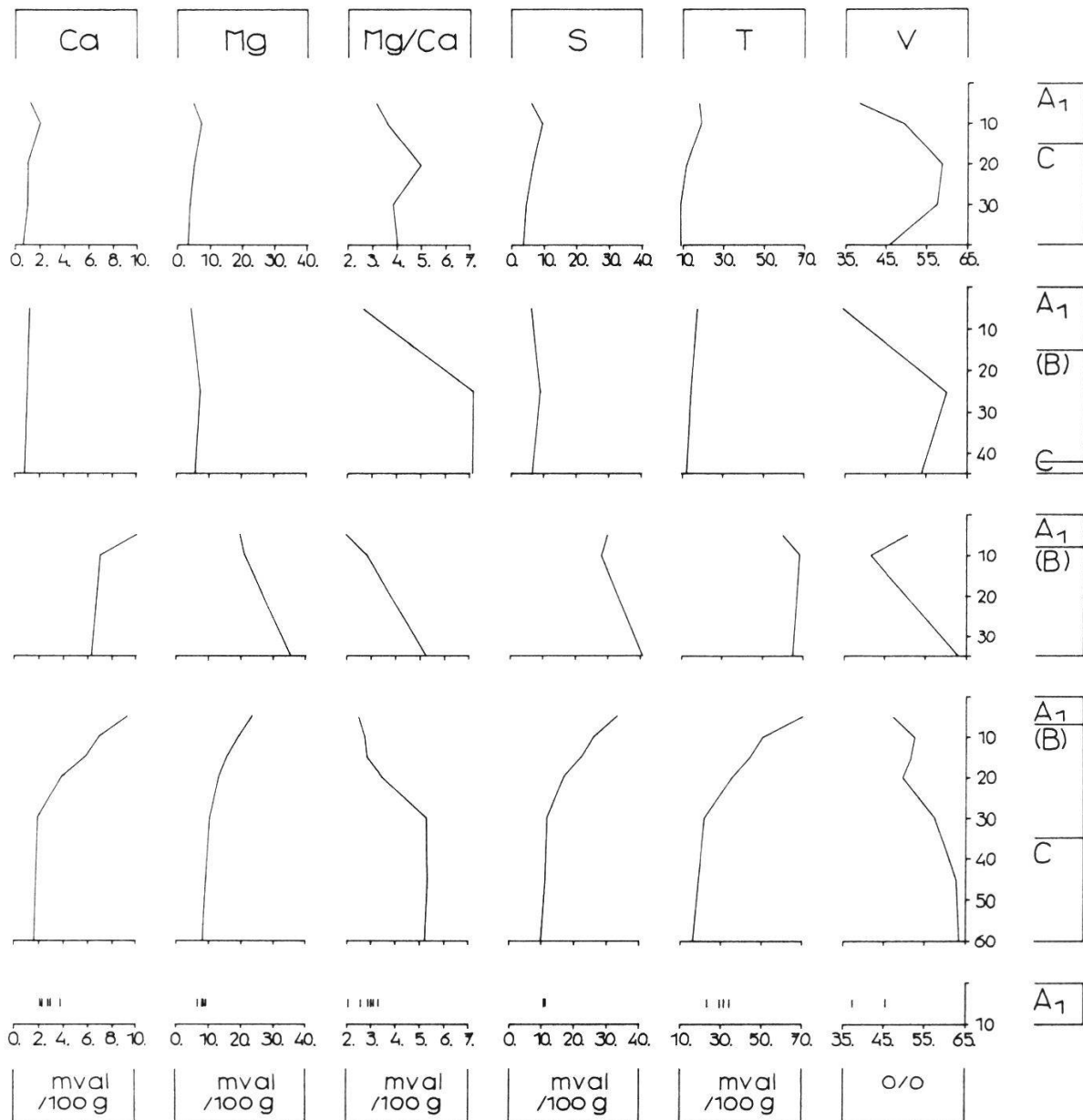


Fig. 45

Pedochemical profiles of rankers on serpentine (pedochemical legend annex 1).

The numbers refer to the profiles described p. 98sq, those in brackets to the vegetation relevés (see p. 128).

No 7 is influenced by opicalcites (see text).

No 9 sums up 6 samples of the same soil (see p. 45).

4.4 Granulométrie et texture

4.4.1 Types de texture

Les textures de la terre fine de l'horizon supérieur de la trentaine de sols serpentiniques étudiés, bien drainés, témoignent d'une diversification remarquable, en gros le long de la progression des sols bruts à développés. Ces sols s'avèrent généralement pauvres en argiles et bien définis par les sables, de texture principalement équilibrée.

*

Les courbes cumulatives de la fig. 46, des types sable à limon sableux, ont été résumées en 5 groupes principalement sur la base de leur teneur en sable, puis en limon, ainsi que sur la base des données de station. Des groupes 1 à 5 les sols passent du brut au développé, tant au niveau du sol lui-même que de la végétation :

- le sable y diminue de 85 % à 25 % ;
- le limon y augmente de 10 % à 25 %;
- l'argile, de 5 % à 25 %, demeure modeste.

Les sols qui contiennent le plus d'argile sont en situation à tendance colluviale. Quant au sol qui a le plus grand hiatus entre les valeurs <20 μ obtenues par sédimentation et >50 μ obtenues par tamisage (voir discussion p. 55), son horizon supérieur a un aspect tourbeux, sous un gazon à *Trichophorum caespitosum* (relevé 100 \times fig. 47-1, avec 29.4 % de matière organique).

*

Selon la classification des textures USDA (fig. 47-2,3) ces sols serpentiniques se répartissent entre (groupes 1 à 5 de la fig. 46) :

- texture sableuse : lithosols à ranker ; végétation I à III; groupe 1
- texture équilibrée : ranker à r. brunifiés; vég. III à VII ; groupes 2 3 4
- texture limoneuse : ranker brunifiés ; végétation VII ; groupe 5

Fig. 46

Courbes cumulatives des textures des sols de serpentine, résumées en 5 groupes, des sols bruts et sableux à développés et limoneux. Les courbes des diagrammes 1 et 2 à texture sableuse correspondent à des sols allant des lithosols alpins aux ranker alpins; les courbes à texture équilibrée des diagrammes 3 à 6 à des ranker alpins brunifiés. (Valeurs rapportées à la terre minérale, calcinée, non décarbonatée, séchée à 105°C, horizon 0-5cm.)

Cumulative texture graphs of serpentine soils, summed up in 5 groups from rough and sandy soils to developed and silty soils. The sandy texture curves from diagram 1 and 2 correspond to soils ranging from alpine lithosols to alpine ranker; the equilibrated texture curves from diagram 3 to 5 correspond to alpine brunified ranker. (Values reported to mineral fine earth, calcinated but not decarbonated, dried at 105°C, horizon 0-5cm.)

S : sand content

F' : fineness coefficient (0 sand; 100 clay)

V : vegetation units (fig. 53 p. 128sq)

A : weathering degree (0 null; 4 strong)

Abscissa : diameter of the granulometric fractions (log!).

Ordinate : participation of the fractions in %.

Diagram 3 : the arrows show the correlation brought on by using the density of augite instead of quartz (p. 55).

Diagram 6 : designation of the curves according SCHEFFER e.a. 1970:19,21, adapted from the German classification.

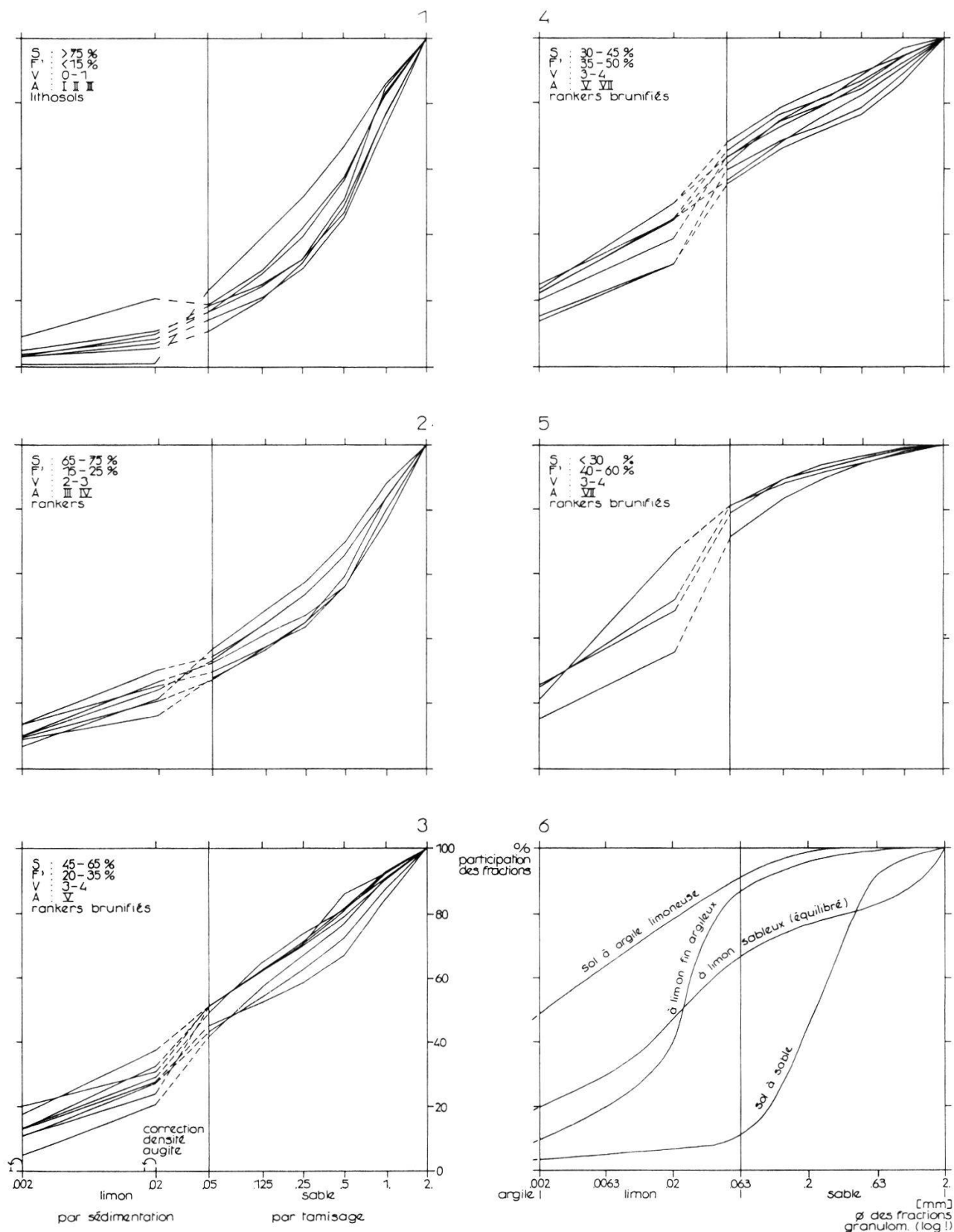


Fig. 46 (voir ci-contre)

S : teneur en sable

F' : coefficient de finesse (0 sable; 100 argile)

V : unités de végétation (p. 130)

A : degré d'altération du squelette (0 nulle; 4 forte)

Diagramme 3 : les flèches indiquent la correction amenée par l'emploi de la densité de l'augite à la place du quartz (p. 55).

Diagramme 6 : dénomination des courbes selon SCHEFFER e.a. 1970:19,21, adapté de la classification allemande.

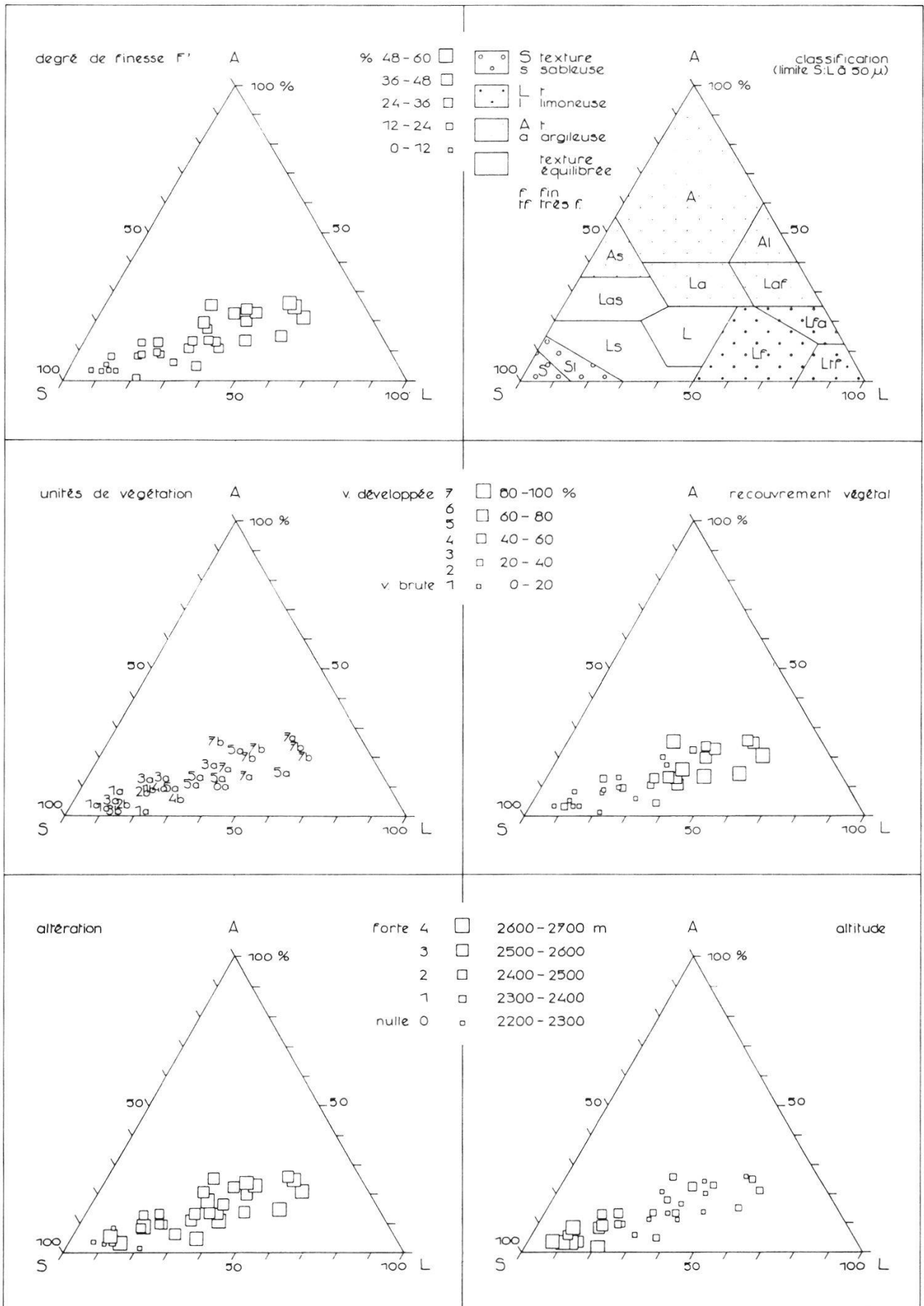


Fig. 47

Corrélations entre texture des sols et variables stationnelles sur serpentinite à Davos (légende pédochimique annexe 1).

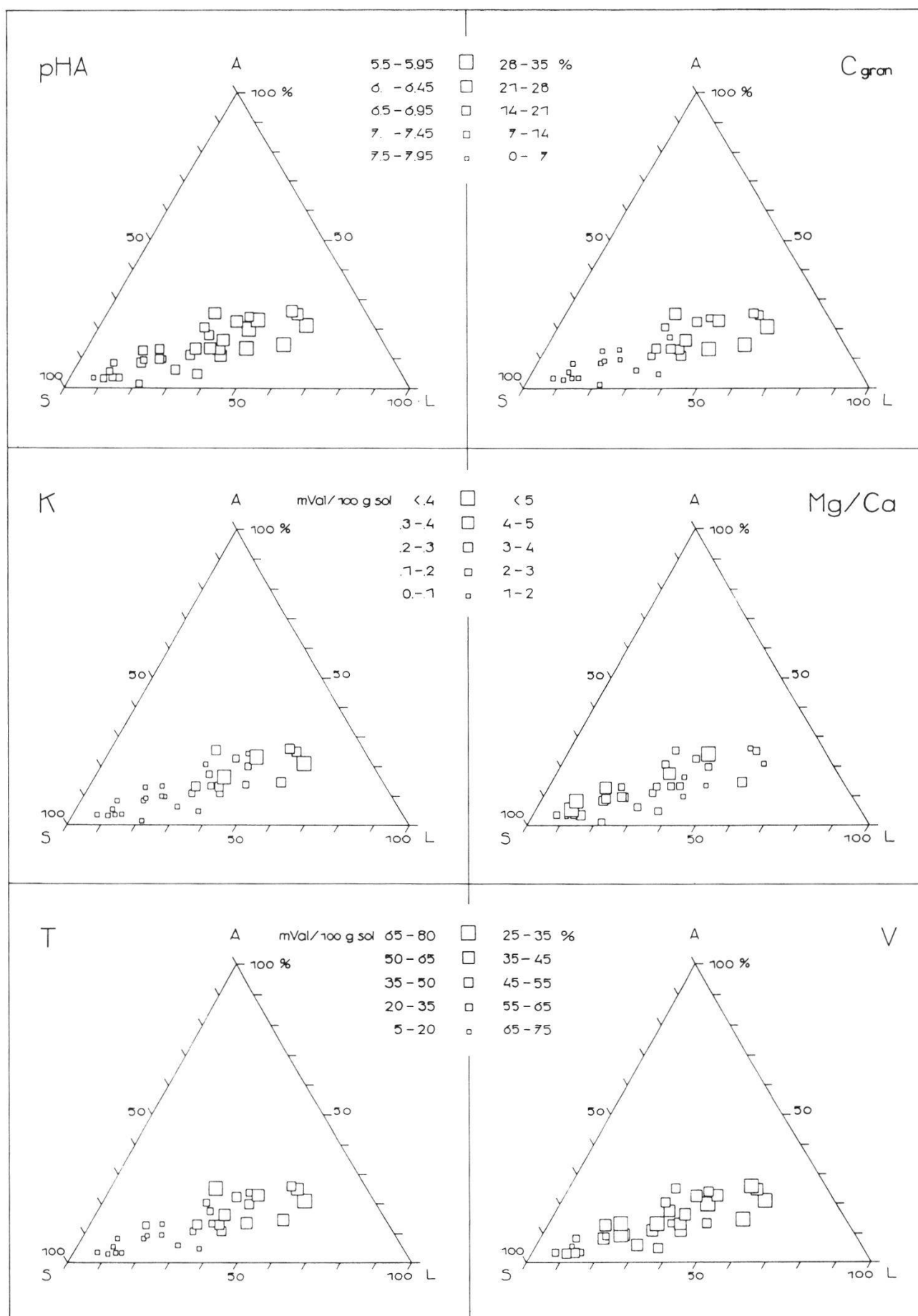


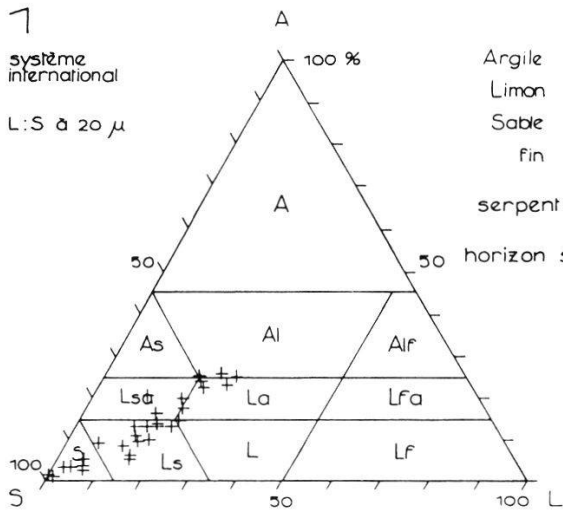
Fig. 47

Correlations between soil texture and habitat variables on serpentine in Davos (pedochemical legend annex 1).

1

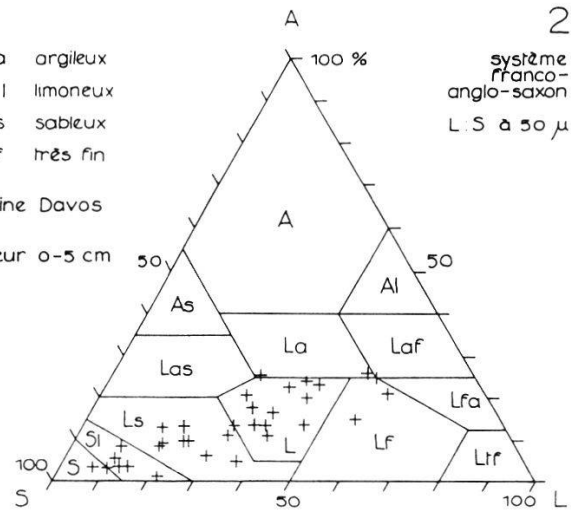
système international

L:S à 20 μ



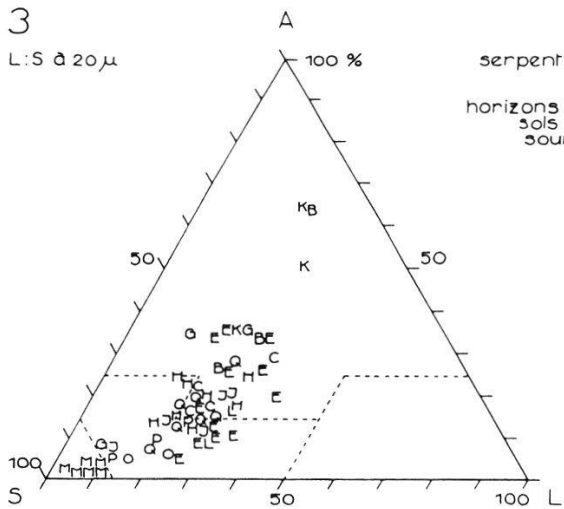
2

système franco-anglo-saxon
L:S à 50 μ



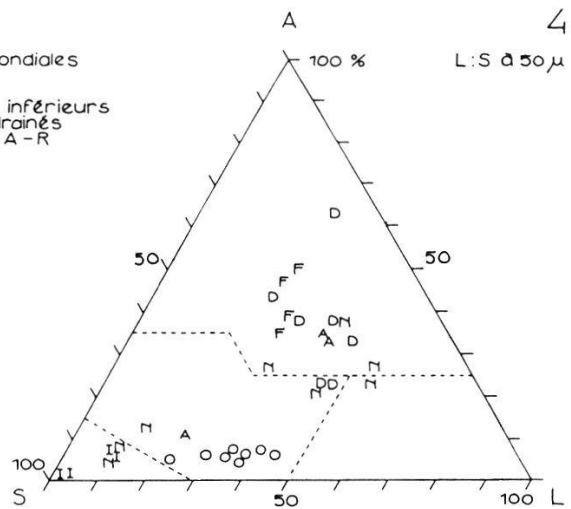
3

L:S à 20 μ



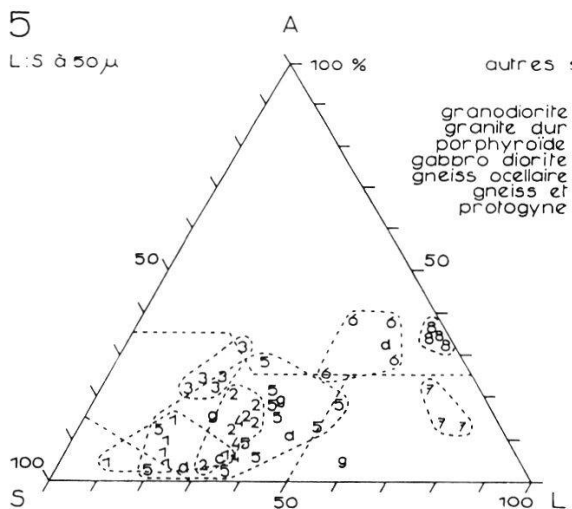
4

L:S à 50 μ



5

L:S à 50 μ



6

L:S à 63 μ

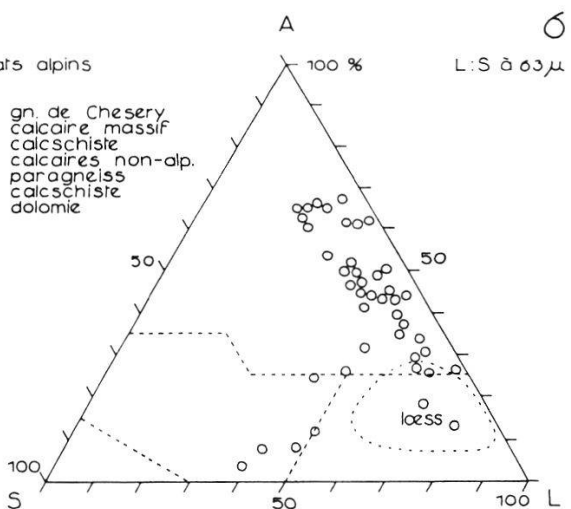


Fig. 48

Triangles des textures de la terre fine des sols (<2mm) : comparaisons.

- 1 Distribution des sols de serpentine de Davos selon le système de classification international, selon STEUBING 1965:123 : limite limon-sable à 20 μ , c.-à-d. limon estimé par sédimentation.
- 2 Distribution des sols de serpentine de Davos selon le système de classification USDA, franco-anglosaxon, selon DUCHAUFOR e.a. 1979:231 : limite limon-sable à 50 μ , c.-à-d. limon défini indirectement par tamisage, système retenu pour la fig. 47. Une part de la différence entre les deux distributions peut être due au hiatus entre tamisage et sédimentation, cf p. 55.
- 3, 4 Textures des sols (bien drainés) de quelques serpentines mondiales, de divers horizons. Sources A-Q ci-dessous.
- 5 Texture des sols alpins (bien drainés, horizon A1) de divers substrats géologiques. 1 2 3 5 6 selon ROBERT e.a. 1981:324; 2 4 7 8 selon BARTOLI e.a. 1979:84, versants sud; g c d de Davos.
- 6 Texture des sols (allemands) les plus fréquents sur calcaires et à loess, selon SCHEFFER e.a. 1977:21.

Soil texture diagrams of the fine earth (<2mm)

- 1 Distribution of serpentine soils from Davos according to the international classification system, STEUBING 1965:123 : silt-sand limit at 20 μ , silt estimated by sedimentation.
 - 2 Distribution of serpentine soils from Davos according to the USDA system, DUCHAUFOR e.a. 1979:231 : silt-sand limit at 50 μ , silt indirectly determined by wet sifting, retained for fig. 47. Part of the differences between the two distributions may be due to a gap between sifting and sedimentation.
 - 3, 4 Textures of the (well drained) soils from some world-wide serpentines, of different horizons. Sources A-Q see below.
 - 5 Textures of some alpine soils (well drained, A1 horizons), from different geological substrata. 1 2 3 5 6 according to ROBERT e.a. 1981:324; 2 4 7 8 to BARTOLI e.a. 1979:84, south slopes; g c d from Davos.
- Texture of wide-spread (German) soils on limestones and on loess, according to SCHEFFER e.a. 1977:21.

auteurs	région	serpentin(it)e	sol	végétation
A BERRE e.a. 1974:138	Limousin	antigorite etc	s. bruns eutrophes	landes herbeuses
B BIRREL e.a. 1945:73	N. Calédonie		s. latéritique	buissons
C COOMBE e.a. 1956a:232,236	Cornouailles	lizardite	ranker brunifiés	landes
D DUVIGNEAUD 1966:282	Limousin		(s. bruns)	landes herbeuses
E GUITIAN e.a. 1980:411sq	Espagne		(s. bruns)	pins + buissons
F KOENIGS e.a. 1982a:5	Californie		(s. bruns)	cypres, buissons
G KRAPPENBAUER 1967:213	Bohème		(ranker)	pins
H MENEZES 1969:123	Espagne	lherzolite	(ranker)	prairie, buissons
I RAGG e.a. 1964:127	Rhum	péridotite	ranker, s.brun	landine, gazon
J RITTER 1963:115	Bosnie		lithosols	(pins noirs ?)
R ROBERTS 1980:235	Terre Neuve		lithosol	forêt clairsemée
K ROBINSON e.a. 1935:9	Cuba	(+diorite ?)	s. latéritiques	(cultivé), pins
L RUNE 1953:115	Suède N		(lithosols-ranker)	semi-gazons
M SAROSIEK 1964:14	Silésie		-	-
N STICHER 78:240;ea 86:282	Davos	augite	s. brun (acide)	pins de m.+bruyères
O VERGER 1979:134; 1982:63	Aoste	serpentinite	lithosols, s.brun	gazons alp, pins sy.
P WERGER e.a. 1978:81	Rhodésie	+ pyroxénite	s. squelettiques ?	savanne, prairie
Q WILSON e.a. 1978:184	Ecosse	lizar. + chrys.	s. bruns de forêt	landes

eutr. = eutrophes m. = montagne sy. = sylvestre chrys. = chrysotile

L'alignement des points qui symbolisent les sols de serpentine sur les triangles des textures est notable. Il ne s'écarte que de quelques 15° de l'axe des sables. Aussi la teneur en sable différencie-t-elle excellemment les sols les uns des autres. Cela ressort déjà des courbes cumulatives. La même chose vaut également pour le coefficient de finesse F' (défini p. 56), qui n'est autre qu'une projection des points sur le côté du triangle des sables aux argiles, côté qui forme un angle de 45° avec l'alignement des points, fig. 71-1. Finesse et sable sont en excellent rapport. Tout en différenciant bien les sols les uns des autres, F' a l'avantage de donner une idée de la teneur en argile, ici pauvreté en argile : F' ne dépasse pas 53. Aussi F' a-t-il été employé pour résumer la granulométrie de la terre fine en une seule valeur dans les calculs des similitudes, fig. 36-4,5,9, et des moyennes des valeurs stationnelles p. 140.

*

Le rapport entre la texture de la terre fine et la pierrosité n'est pas évident (comparer squelette superficiel p. 138 et F' p. 140) : la finesse de la texture corrèle surtout directement avec l'importance de la couverture végétale et son apport de matière organique; avec l'abondance de la terre fine dans les horizons superficiels; ainsi qu'avec une tendance géomorphologique colluviale (ou du moins stable sans exports). C'est d'ailleurs ce caractère colluvial qui favorise principalement les précédents et garantit un développement prononcé du sol.

4.4.2 Corrélations entre texture et variables stationnelles

La confrontation des textures avec les variables stationnelles livre des résultats qui corroborent ceux des analyses des correspondances, fig. 36-4,5,9 p. 76sq. Les sols s'articulent le long du développement des stations (légende pédochimique et stationnelle annexe 1) :

- en gros correspondances avec les unités de végétation décrites indépendamment fig. 47-3;
- bonnes correspondances avec $\text{rec alt C N Ca Mg K T}$ qui augmentent avec la finesse de la texture; ainsi qu'avec hau et pH qui décroissent avec l'augmentation de cette finesse;
- corrélation lâches avec Mg/Ca , assez quelconque avec V Nm P ;
- ni pente ni exposition ne sont liées à une texture particulière.

En résumé on peut décrire 2 groupes :

- textures sableuses à limoneuses-sableuses : typiques des sols peu évolués, lithosols à ranker alpins, à maigre végétation, unités I à IV; des sols à structure nulle (particulaire) ou médiocre, les rendant sensibles à l'érosion et au lessivage; à teneurs faibles en éléments nutritifs; fig. 46-1,2;
- textures équilibrées à limoneuses-fines : typiques des sols plus développés, ranker alpins brunifiés, protégés par une certaine couverture végétale, unités II à VII; à structure convenable; à meilleure disponibilité en éléments nutritifs; fig. 46-3,4,5.

4.4.3 Granulométrie : discussion

Les textures des horizons supérieurs des sols serpentiniques alpins de Davos s'inscrivent parfaitement parmi celles des sols serpentiniques mondiaux (ne sont considérés ici que les sols bien drainés). Notons que les profils des sols, inclus dans les fig. 48-3,4, s'insèrent dans la même distribution, leur texture rejoignant d'autant plus les sables que les horizons s'approchent de C. Ce fait est sans doute indirectement lié au type d'altération de la serpentine. Les sols les plus développés de Davos, alpins, révèlent ainsi des textures comparables p.ex. à celles de sols brunifiés et bruns sous landes secondaires de Cornouailles et d'Ecosse, fig. 48-3.

On peut entrevoir une certaine tendance des sols serpentiniques à évoluer en gros vers S=L=A sous les climats tempérés, p.ex. sols bruns sous forêts de pins; puis à s'argiliser sous climats chauds humides, sols ferrallitiques (latéritiques) et anciens, fig. 48-3,4.

Si l'on se réfère aux sols alpins sur d'autres roches-mères discutés par ROBERT e.a. 1981:324 et BARTOLI e.a. 1979:84, les textures sur serpentine s'inscrivent le mieux parmi celles sur silicates, d'une part du type massif tel granite et diorite, d'autre part du type gneiss dont elles recouvrent largement le spectre, fig. 48-5. Il se peut que la texture du sol soit tributaire de la "texture" de la roche serpentine de départ : la diversité de la roche-mère observée à Davos, allant du massif au feuilleté, est ainsi peut-être en lien avec la diversité pour le moins surprenante, des textures trouvées dans les sols.

Par contre les textures sur serpentine tendent à différer de celles sur roches carbonatées ou fortement schistées en ce qu'elles ne contiennent jamais autant de limons, fig. 48-5,6. Bien qu'à Davos les textures de 7 sols voisins sous pelouse, analysés simultanément, fig. 48-5, sur gneiss, calcschiste et dolomie, soient en gros du même type que sur serpentine.

ROBERT e.a. 1981:325 insistent sur l'altération intense des roches cristallines en milieu alpin. Il y a à la fois dissolution, disjonction des grains et argilification (gels) concomittante; la disjonction des grains ayant lieu dans les horizons profonds (arénisation), la formation d'argile dans les horizons les plus superficiels. C'est ce qui explique la granulométrie extrêmement variée à cet étage et en particulier la présence d'argile dans ces sols, alors que les roches cristallines ne contiennent en principe pas d'argile granulométrique.

La composition minéralogique varie selon les fractions granulométriques en fonction surtout de la grosseur de départ et de la rapidité d'altération spécifiques des minéraux (cf p. 115sq). C'est ce que STICHER e.a. 1986:285 décrivent à l'exemple de l'horizon B d'altération d'un sol brun acide subalpin de Davos sur serpentine-augite, sous forêt de pins (à texture limoneuse-argileuse) :

- les sables rassemblent des grains de serpentine le plus souvent non altérée (chrysotile et lizardite) et un peu d'augite;
- les limons de l'augite;
- les argiles des fibres singulières des minéraux serpentine chrysotile et lizardite et un peu de grenat. Il n'y a pas de néoformation d'argiles.

4.5 Altération et pédogénèse sur serpentine : discussion

L'altération et la pédogénèse sur serpentine restent encore peu étudiées. Les serpentines sont pour la plupart logées dans des régions montagneuses où elles forment souvent des monts et des arêtes aux larges flancs raides. Elles ont une tendance plus ou moins générale à former des sols squelettiques et superficiels. Aussi les hypothèses les plus variées ont-elles été émises pour expliquer la pauvreté en terre fine.

A Davos la fraction grossière peut être constituée principalement de gros blocs, ou alors s'enrichir de toute la gamme granulométrique, jusqu'à former des étendues de gravier. Pratiquement la serpentine comprend déjà dans les fractions grossières les désagréations et délitations les plus divergentes; elle livre, parmi les sols bruts qui sont les plus répandus, des sols gris-bleu clair jusqu'à gris-noir, ou alors, sous l'effet de la libération de fer plus ou moins intense, des sols allant de l'ocre clair au brun sombre (voir description p. 102). Quant à la texture de la seule fraction fine, <2 mm, bien différenciée dans le domaine limoneux-sableux, fig. 48-3,4, elle correspond à une texture largement équilibrée, si ce n'est sableuse pour les sols bruts, généralement pauvre en argiles (bien qu'en quantité suffisante pour permettre la brunification p. 95).

4.5.1 Résistance à l'altération

Dans sa récente monographie géobotanique sur les serpentines BROOKS 1987:18 dit encore qu'il ne semble guère y avoir de consensus au sujet de la résistance à l'altération des roches ultramafiques.

D'une part les serpentologues classiques (PICHI 1948:29; COOMBE e.a. 1956b: 613; KRAUSE 1958:764, etc. et BERGER 1921:5,6) déduisent plus ou moins ouvertement à partir des sols squelettiques, une forte résistance à l'altération; ou encore (RITTER 1956; DUVIGNEAUD 1966:273, etc.) une prédominance de la désintégration physique et mécanique sur l'altération chimique.

D'autre part, la géologie enseigne que les minéraux des roches serpentines (voir p. 32), considérés comme des édifices fragiles, s'altèrent plutôt aisément. Dans les séquences d'altération de la fig. 49, se basant sur la résistance à la dissolution en présence d'eau pure de la fraction fine ou colloïde, pour des particules de taille comparable, les minéraux mafiques primaires c.-à-d. provenant des roches, tels les minéraux olivine, augite, pyroxène, comptent parmi les moins résistants. Certes, clairement plus que le gypse et la calcite, mais moins que tous les minéraux magmatiques, y compris les micas et tous les minéraux argileux secondaires c.-à-d. néoformés. Le minéral serpentine est différent, plus résistant, voir ci-dessous.

La résistance à l'altération n'est que vaguement corrélée à la dureté du minéral, contrairement à ce qui est parfois affirmé. La résistance augmente d'une part avec la complication de la structure même des silicates, depuis les néso = ortho-silicates en îlots, ino- en chaînes et bandes, phyllo- en couches, jusqu'aux tecto-silicates à structure spatiale, c.-à-d. augmente avec la condensa-

		séquences d'altération (résistance croissante) minéraux		dureté (échelle de Mohs)	charge négative par feuillet (phyllo-silic.)	CEC mval/100g	surface spécif. m ² /g	grandeur des particules	constitution chimique	typé de silicate Si:Me (cf p. 114)	structure
		magnet.	colloïd.								
minéraux silicatés primaires	quartz	22	6	7		1-4		moy-gros	SiO ₂	tecto-	(spatiale)
	feldspath	11-16	5	6		5		20-200	(K,Na,Ca)Al Si ₃ O ₈	tecto-	
	amphibole	6	3	5-6				20-200	Ca ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ (Si ₄ O ₁₁) ₂ (OH) ₂	ino-	(chaînes, bandes)
	pyroxènes	5		5						ino-	
	enstatite			5-6						ino-	
	augite	5	3	5		12*		moy.	Mg ₂ Si ₂ O ₆	ino-	
	olivine	2	3	6					(Ca,Mg,Fe,Al) ₂ Si ₂ O ₆	néso-	(=ortho, îlots)
	grenat	13		6-7				<2-10	(Mg,Fe) ₃ (Fe,Al) ₂ (Si ₄ O ₄) ₃	néso-	
minéraux argileux = phyllo-silicates p: primaires s: secondaires (= clay minerals)	chlorite Mg	p	4	1-2	variable	10-40		m-g	Mg ₁₂ (Si ₄ O ₁₀) ₂ (OH) ₁₆	phyllo-	(couches)
	chlorite Al	ps	4	1-2	variable	10-40			Al ₁₈ (Si ₄ O ₁₀) ₂ (OH) ₁₆	2:1:1	lamelles
	micas (illites)	ps	4-7	2-3	1-4	20-50	100	<.2	K ₂ (Mg,Fe,Al) ₆ (AlSi ₃ O ₁₀) ₂ (OH) ₄	2:1	lamelles
	vermiculite	s	8	1-2	.6-.9	100-200	750	2-2000	8H ₂ O Mg ₂ (Al,Fe) AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2:1	petites lamelles
	smectites	s						<.5		2:1	petites lamelles
	nontronite	s	4	1	.2-.6				(Fe,Al,Mg) AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2:1	lamelles-fibres
	bédellite	s		1	.6	40-60			Al ₂ Me(I) AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2:1	lamelles
	montmorillonit.	s	9	1	.2-.6	50-150			(Al,Mg)Me(I) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2:1	petites lamelles
	talc	ps		1	0	4	11-42		Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀) ₂ (OH) ₄	2:1	lamelles
	halloysite	s			0	5-10		fin	4H ₂ O Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1:1	tubes, sphères, lam.
	kaolinite	s	10	1	0	3-15	25-76	m-g	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1:1	petites lamelles
	serpentine	p		3-4	0	~0			Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	1:1	bâtonnets-fibres
	chrysotile	p							"	1:1	lamelles
	lizardite	p							"	1:1	lamelles
	antigorite	p							"	1:1	lamelles
carbonates et sulfates	calcite		2	3					CaCO ₃		
	dolomite		2	3-4					Ca,Mg(CO ₃) ₂		
	magnésite			4					MgCO ₃		
	sidérite			4					FeCO ₃		
	gypse		1	2					CaSO ₄ .2H ₂ O		
oxydes et hydroxydes	brucite							<2	Mg(OH) ₂	m : moyen g : gros 1 BACH 1976:8-26,53,60,230 2 DUCHAUFOR e.a. 1977:341; 1979:43-52,230 3 GRAUBNER 1980 4 IBERG 1954:69 5 SCHEFFER e.a. 1976:33-41,87 6 STICHER 1978:241, *oral 7 STOTSKY 1966:832	
	corindon		13	9					Al ₂ O ₃		
	gibbsite(bauxite)		11						Al(OH) ₃		
	hématite		12	6					Fe ₂ O ₃		
	magnétite		12	5					Fe ₃ O ₄		
	goethite		12						FeOOH		
	limonite		12	1					FeOH		
	illménite	~20	13	4-7					FeTiO ₃		
	rutile, anatas	20	13	5-6					TiO ₂		
allophanes						450			Al ₂ Si ₁₀ .5H ₂ O		
partic.org.(min.arg.amorphes)					400	800-1000					
humus(acid.+complexes humiq.)					260-370	700					
sources		1	1	1,3	2,5	1,2,4-6	7	2,6	1,2	1	1

Fig. 49

Propriétés physico-chimiques des minéraux primaires et argileux des sols serpentiniques et termes de comparaison.

Physico-chemical properties of primary and clay minerals.

tion en Si (fig. 49). Or les mafiques cités ci-dessus sont de structure simple, néso- et ino-silicates. La résistance augmente d'autre part avec la proportion en SiO_2 , plus élevée dans les minéraux des roches acides, plus basse dans ceux des basiques. Or les minéraux mafiques des roches ultrabasiques sont relativement pauvres en SiO_2 , par contre riches en Mg et Fe, points faibles sur le plan de l'altération chimique, comme dans une moindre mesure Ca (BACH 1976:8,24; DUCHAUFOR e.a. 1977:7; SCHROEDER 1972:17).

Les minéraux serpentines, eux, sont plus résistants que les autres minéraux mafiques. En effet, avec le talc et la chlorite, ce sont des phyllosilicates, les trois des minéraux magnésiens exclusivement en provenance de roches métamorphiques s'ils sont primaires. Pauvre en SiO_2 puisque de structure 1:1, une couche de silice pour une d'hydroxydes métalliques, le minéral serpentine est un isomorphe de la kaolinite, comme la chlorite de structure 4:4 l'est d'autres argiles alumineuses, où Mg remplace Al. Or Al est un cation très peu mobile, cela lui vaut d'ailleurs d'être l'élément fondamental de référence des argiles et de la pédogénèse, les argiles habituelles étant des hydrosilicates d'Al. Alors que Mg, lui, est nettement plus mobile (PEDRO e.a. 1966:612) : c'est bien ce qui ressort de la séquence d'élimination la plus fréquente sur serpentine en climat tempéré, qui est $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Fe}_2\text{O}_3 < \text{SiO}_2 < \text{MgO}$, fig. 50. On peut dès lors s'attendre à ce que les argiles magnésiennes soient plus faibles que leurs isomorphes alumineux, ce qui pourrait bien signifier une dissolution plus rapide des minéraux serpentines dans la fraction argileuse.

*

La résistance des roches à la désagrégation physique est un autre chapitre. Elle dépend (BACH 1976:57; SCHROEDER 1972:19) :

- de la structure de la roche : roche massive plus résistante que fissurée >stratifiée> feuilletée
 - de la consistance de la roche : compacte plus résistante que poreuse
 - de la texture de la roche : à cristaux fins plus résistante
 - du ciment liant les grains : silicaté plus résistant que carbonaté
 - de l'homogénéité des minéraux : roche homogène plus résistante
 - de la résistance des minéraux singuliers
- et d'autres facteurs tels altération déjà débutée, climat, etc.

Ainsi paradoxalement les minéraux à résistance à l'altération plutôt faible sont à même de former des roches très homogènes ou compactes, à désintégration physique limitée. Exemple extrême, le minéral olivine peut former des roches dunites résistantes. Alors que les serpentinites, assez souvent inhomogènes, fissurées et cisailées de par leur origine souvent métamorphique, peuvent se désagréger en petits blocs ou feuillets, susceptibles de livrer une gamme granulométrique bien pourvue jusqu'aux graviers. RUNE 1953:101 résume cela en disant que l'altération et la capacité de fournir un sol augmentent avec le degré de serpentinisation. Pour compléter la palette WIRTH 1972, dans sa monographie sur les lichens des silicates, va jusqu'à comparer une serpentinite monominérale très finement granulée, donc très résistante, à des granites et basaltes.

Bref, vu l'extrême variabilité minéralogique et pétrologique de la serpentine, sans parler de l'incidence du climat et du temps, on comprend qu'aux roches serpentines ou ultramafiques correspondent les types et les produits de désagrégation physiques et d'altération chimique les plus divers et même contradictoires.

*

Ainsi pour ses profils serpentiniques subalpins de Davos, STICHER (1978:240; 1986:6; minéraux principaux chrysotile et lizardite) décrit la répartition des différents minéraux, riches de leur composition chimique originale, dans les fractions granulométriques correspondant à la grosseur des cristaux dans la roche-mère. Précisons que la roche serpentine véritable, très finement granulée, est très compacte à Davos. Par contre les zones d'augite plus poreuses se désagrègent plus facilement et cèdent en premier lorsqu'elles sont soumises à des forces mécaniques. A tel point que dans les éboulis prédominant des pierres à

coeur riche en serpentine et à manteau d'augite. Alors qu'il y a accumulation relative d'augite dans la fraction fine des horizons d'altération.

Lors de l'altération physique, la roche se défait jusqu'aux minéraux singuliers. Le minéral serpentine chrysotile se désagrège en fibres et faisceaux de fibres tout au plus de .001 mm et se retrouve de ce fait principalement dans la fraction des argiles <.002 mm qu'il domine presque exclusivement. A cause de sa surface spécifique élevée, il est fortement soumis à l'altération chimique, sa stabilité diminuant en outre rapidement avec l'acidification. Par ailleurs les noyaux de serpentine non complètement désagrégée tendent à s'accumuler dans les sables et au-dessus, >.200 mm (id. chez LOPEZ e.a. 1984). Le minéral augite, avec ses cristaux de .100 à .200 mm dans la roche, se retrouve dans les limons grossiers et sables fins (maximum entre .020 à .060 mm). Malgré sa surface spécifique très restreinte comparé au chrysotile, l'augite est très peu résistant chimiquement et tend à disparaître des fractions inférieures à .020 mm dans les sols et horizons altérés. Alors que le grenat avec ses cristaux <.125 mm dans la roche, très résistant, s'accumule jusque dans la fraction argileuse.

MENEZES (1969:130sq, ultramafites du Portugal, sans précisions minéralogiques) conclut que c'est le processus d'altération, à savoir une dissolution d'autant plus rapide que les éléments sont fins, et non la résistance des minéraux de la roche à l'altération qui est susceptible d'expliquer la superficialité des sols sur serpentine. En se référant à la teneur en TiO_2 admise stable, il observe une dissolution plus lente dans les horizons (supérieurs) où il y a encore des sables et des graviers en voie de désagrégation, et un pH différant selon les fractions granulométriques, les fines étant plus acides. En climat tempéré il subsiste généralement sur serpentine suffisamment de matériau grossier, s'amenuisant progressivement, pour assurer une juxtaposition de toutes les tailles. Enfin VERGER 1982:62 pour ses serpentines montagnardes du Val d'Aoste conclut, en particulier à partir des teneurs et formes des Fe et Mg, à une altérabilité chimique actuelle changeante de la roche, moindre dans les sols plus évolués pourtant plus acides.

*

Afin de donner une idée du taux d'altération, on peut citer la perte annuelle par lessivage qui comporte pour du matériau de serpentine .017 % selon les expériences lysimétriques de GEERING 1943:152sq, qui a exposé 7 années aux intempéries 250 kg de matériau fin et grossier sur 1/6 m² de surface à 2000 m d'altitude à Maran, soit à 13 km à l'ESE du Totalphorn. Les pertes pour la serpentine sont semblables à celles pour du schiste lustré. Le $CaCO_3$ de sa serpentine, qui contient autant de Ca que notre augite, est proportionnellement plus rapidement entraîné.

JUCHLER 1988:76,138sq, pour la serpentine subalpine de Davos, évalue le taux d'altération par plusieurs chemins (teneur des eaux de percolation recueillies dans des lysimètres; épaisseur théorique des horizons, etc.). Il estime un taux d'altération de 15 à 25 g/m².an, pour une épaisseur de 40 cm de sol (dont 10 g de substances pédogènes, surtout hydroxydes de fer et humus, qui restent dans le sol). En prenant la densité de 2.7 kg/l, cela correspond en gros à un taux annuel de .002 % d'altération.

Alors que CLEAVES e.a. 1974 (ex JUCHLER 1988:142), pour une serpentine du Maryland, à partir de l'export de matériau d'un bassin d'alimentation de ruisseau, estiment un taux d'altération de 2.2 m par million d'années, correspondant en gros à 6 g/m².an en admettant une densité de la roche de 2.7 kg/l.

L'altération chimique des ultramafites est assimilable à une dissolution, concluent PEDRO e.a. 1966:647 (et 1971:1546) qui ont drainé expérimentalement, à raison de 2400 m/j pendant 6 mois à 70°C, des fragments concassés à 4 g de serpentinite des Vosges riche en olivine et pyroxènes. En présence d'eau pure l'altération n'est généralement pas beaucoup plus rapide que pour les matériaux aluminosilicatés, confirmant par là les résultats de Maran. Au contraire du CO_2 , l'acide acétique, organique faible, n'intensifie que peu le lessivage des éléments : ce par quoi ces auteurs s'expliquent le degré d'évolution de ces sols plus faible que ceux rencontrés sur matériaux plus acides. Il se peut que les

acides organiques soient au fur et à mesure rapidement neutralisés par les produits d'altération, en particulier le Mg et le Fe, voir ci-dessous.

*

Bref, il reste peu clair si la pauvreté en terre fine sur serpentine en zone tempérée et froide est surtout due à la dissolution de cette fraction fine plus rapide que l'apport de matériau résultant de la désintégration des fractions grossières, ce qui suggérerait une discordance entre altérabilité de la roche et celle de ses minéraux dans la fraction fine. Pour répondre à cette question l'étude de la granulométrie complète comportant squelette et terre fine, ainsi que des rapports quantitatifs entre désintégration physique-mécanique et altération chimique, s'avère nécessaire.

Cortex d'altération des serpentines

Bien des serpentines ont la caractéristique de former à la surface des pierres une croûte d'altération jusqu'à 5 mm d'épaisseur, tranchant déjà par la couleur plus rouille ou plus claire que le coeur. Sur les gros blocs, et particulièrement pour les serpentines à texture massive et granulée, cette croûte peut être extrêmement rugueuse et les différentes composantes minéralogiques se carier différemment, les plus résistantes subsistant en îlots acérés et dépassant parfois de près d'1 cm. Dans l'augite les incrustations de pyroxènes sont éliminées en premier (PETERS 1963:619).

L'existence de ce cortex a inspiré quelques chercheurs à tenter de saisir déjà là les premières directions prises par l'altération (cf fig. 50, PEDRO e.a. 1966, BERRE 1974 et JUCHLER 1988 chimiquement; STICHER 1978b minéralogiquement). Subtile, l'analyse de cette croûte permet p.ex. d'obtenir des valeurs isovolumétriques, donc plus réelles, des pertes effectives d'éléments lors de l'altération (p. 118). L'extrapolation sur le sol des tendances d'altération du cortex reste néanmoins délicate.

En effet pour une localité subalpine à roche-mère pleinement serpentinisée de Davos avec <5 % d'augite, STICHER 1978b:7,9 constate que la délitation résulte le plus souvent en pierres (>1 cm) à coeur serpentinisé, ayant par conséquent perdu tout le Ca lors de la métamorphose; et à cortex d'altération jusqu'à 5 mm d'épaisseur beaucoup plus riche en augite, plus riche en Ca Mg Fe Cr, parfois en Al Mn Ti Ni, et partiellement plus riche en grenats. Ce cortex est lui-même enrobé d'une mince pellicule finement granulée colorée en rouge rouille de par sa teneur élevée en hydroxydes de Fe amorphes, et encore plus enrichie en augite que le cortex. Comme ce dernier est poreux, il est plus aisément la proie de la désintégration physique et il se retrouve aussi sélectivement accumulé dans les fractions fines.

Pour la même région JUCHLER 1988:62,74 constate que la croûte d'altération d'une pierre de serpentinite (augite ?) du squelette de l'horizon Ao s'appauvrit relativement en Ni et Mg, et s'enrichit en Cr Fe Al Mn Ti. D'après son étude au microscope de lamelles polies, le minéral serpentine tend à se dissoudre diffusément, par nuages, alors que les pyroxènes se désagrègent en plaquettes de 50 µm (ce qui peut contribuer à la distribution spécifique de Ni et Cr dans le profil, cf p. 121).

Il n'est pas clair de quelle manière cette croûte d'altération influence l'altération ultérieure, en particulier si elle la retarde ou l'empêche.

4.5.2 Changements géochimiques et fraction solubilisée

En définitive, ce sont les fractions libérées lors de l'altération et leur comportement au cours de la pédogénèse qui sont à l'origine des changements plus ou moins massifs entre roche-mère et sol en dérivant. Les fig. 50 et 51 illus-

trent ces changements pour diverses serpentines à partir des données sur le terrain. La séquence d'élimination relative (vitesse q) la plus fréquente sous toutes latitudes est :

$q_{Al,Fe} < q_{Si} < q_{Ca,Mg}$

c.-à-d. un type d'altération souvent dite "siallitique" à cause de l'élimination des bases > silice, bien qu'au sens strict celle-ci définisse une altération des roches aluminosilicatées conduisant en outre à la néoformation d'argiles ou minéraux secondaires (DUCHAUFOR e.a. 1979:60-65).

En zone froide, et partiellement en zone tempérée, les changements géochimiques restent cependant très modestes, fig. 51 : soit que l'altération et la pédogénèse restent très ménagées, soit qu'elles correspondent à une dissolution plus ou moins congruente des principaux éléments. Notons que MENEZES (1969:135 pour une serpentine du Portugal) envisage la coexistence de deux processus d'altération antagonistes à l'intérieur d'un même sol et horizon, mais correspondant dans l'ensemble à une dissolution simultanée des Fe Al Si Mg, fig. 50. Avec le temps, en zone tempérée, il y a élimination de Mg jusqu'à une accumulation quasi exclusive de Si parallèlement au maintien des sesquioxydes; alors qu'en zone tropicale il y a élimination des bases et de Si jusqu'à une accumulation quasi exclusive des sesquioxydes.

Les expériences lysimétriques de GEERING 1943, voir p. 116, confirment l'évolution ménagée en climat froid : elles révèlent une faible élimination congruente de SiO₂, R₂₀₃ et MgO. Par ailleurs, l'évolution des roches et cortex de roche altérés par rapport à la roche fraîche, analysés par BERRE e.a. 1974:139 et par PEDRO e.a. 1966:617, confirme largement celle des sols; de plus la séquence d'élimination à partir des valeurs isovolumétriques des roches saine et altérée est la même que celle à partir des valeurs non isovolumétriques.

Ajoutons que pour la serpentine subalpine de Davos JUCHLER 1988:137 arrive à une séquence d'élimination hors du profil semblable à celles de la fig. 50, soit $Ti < Al < Cr < Fe < Ca < Mn < Si < Ni < Mg$, au moyen des différences, pour chaque élément, de l'épaisseur théorique de la suite des horizons, calculée à partir de la teneur actuelle de chaque élément rapportée à la teneur de l'horizon C.

La serpentine s'inscrit ainsi parmi les roches basiques tant magmatiques que sédimentaires, où sous nos climats l'altération tend à s'accompagner de la lixiviation des Ca ou Mg; de l'accumulation de SiO₂ dans l'horizon supérieur; de la saturation importante du complexe d'échange par des bases, la roche-mère influençant ainsi plus longtemps la pédogénèse (SCHAUFELBERGER 1954:21).

*

Il se dessine donc premièrement sur serpentine une tendance générale à l'élimination du Mg des horizons supérieurs d'autant plus forte que le climat est chaud et les sols anciens (p.ex. Maryland USA, fig. 51), restant toujours plus importante que l'élimination de Si.

Fig. 50

Geochemical changes on serpentine during weathering and pedogenesis : relative eliminations in the soils and in the weathering crust of the rocks, calculated from the molar ratios of the total oxide contents two by two. The sequences calculated from the simple elements are the same as those from their oxides.

D to S : bibliographical sources, see legend fig. 50

R : sesquioxides $R_{203} \cong Al_{2O3} + Fe_{2O3} + .45 FeO$; Cr_{2O3} etc. negligible; if no indication, calculated for Fe_{2O3} , generally more important

r : sane rock

r1 : average of serpentines according to KRAUSE 1958:764

r2 : serpentine from Davos, according to PETERS 1963:624,625

p1 to p4 : horizons of the profile, from bottom to top

a : weathered crust of the rock

c : weathered rock of horizon C

lieu	direction d'altération	vitesse d'élimination relative		
		résumé	suite	vitesse q
D Maran	r ₂ →p ₁	Si<Mg<R	(Ca)<Si<Mg<R	1. : 151 : 16 : 175
E Totalp	r →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Si<Mg<Ca	1. : 157 : 163 : 175 : 785
F Aoste	r →p ₁	R <Si<Mg	Ca<Al<Ti<Si<Mg<Fe	1. : 143 : 16 : 173 : 176 : 178
G Portugal, NE	r →c	R <Si<Mg	Ti<Al<Fe<Ca<Si<Mg	1. : 29 : 684 : 787 : 106 : 151
	c →A ₁₂	R <Si<Mg	Ti<Al<Fe<Si<Mg<Ca	1. : 112 : 118 : 182 : 263 : 556
	A ₁₂ →A ₁₁	Mg<Si<R	Ca<Si<Mg<Fe<Al<Ti	1. : 189 : 193 : 204 : 231 : 235
H Limousin	r →c	R <Si<Mg	Fe<Ti<Al<Si<Mg<Ca	1. : 11 : 125 : 135 : 143 : 146
	c →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Si<Ca<Mg	1. : 157 : 192 : 303 : 635
	p ₁ →p ₂	R <Si<Mg	Al<Fe<Si<Ca<Mg	1. : 122 : 126 : 145 : 15
I Vosges	r →a	R <Si<Mg	R <Si<Mg<Ca	1. : 193 : 226 : 278
J Toscane	r →p ₁	R <Si<Mg	Fe<Al<Si<Mg	1. : 115 : 124 : 151
R Bos-:rendzine nie sol brun parapodz.	r →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Si<Ca<Mg	1. : 128 : 221 : 216 : 67
	r →p ₁	R <Si<Mg	Fe<Al<Si<Ca<Mg	1. : 101 : 146 : 186 : 327
	r →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Si<Ca<Mg	1. : 124 : 151 : 641 : 866
L Maryland	r →c	R <Si<Mg	Fe<Si<Ti<Mg<Al	1. : 111 : 115 : 126 : 151
M Maryland	r →p ₁	R <Si<Mg	Ca<Al<Si<Fe<Mg	1. : 7 : 117 : 129 : 358
	p ₁ →p ₂	R <Si<Mg	Ca<Al<Ti<Si<Fe<Mg	1. : 131 : 155 : 161 : 188 : 243
	p ₂ →p ₃	R <Si<Mg	Ti<Al<Si<Fe<Ca<Mg	1. : 115 : 129 : 139 : 161 : 4
	p ₃ →p ₄	Si<R <Mg	Si<Ti<Al<Ca<Mg<Fe	1. : 111 : 174 : 199 : 24 : 248
N Californie	r ₁ →p ₁	Si<Mg<R	Al<Si<Mg<Fe	1. : 134 : 138 : 156
O Oregon	r →p ₁	R <Si<Mg	Ti<Al<Fe<Si<Ca<Mg	1. : 428 : 433 : 7 : 98 : 115
Q Cuba	r ₁ →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Ti<Si<Mg	1. : 131 : 546 : 15 : 685
	r ₁ →p ₁	R <Si<Mg	Al<Fe<Ti<Ca<Si<Mg	1. : 158 : 235 : 15 : 295 : 504
S Nle Calédonie	r ₁ →p ₁	R <Si<Mg	Fe<Al<Ca<Si<Mg	1. : 107 : 148 : 18 : 481.
	p ₁ →p ₂	R <Si<Mg	Fe<Al<Si<Ca<Mg	1. : 252 : 375 : 664 : 857
	p ₂ →p ₃	Si<R <Mg	Al<Si<Fe<(Ca)<Mg	1. : 237 : 308 : ∞ : ∞

Fig. 50

Changements géochimiques sur serpentine au cours de l'altération et de la pédogénèse : éliminations relatives dans les sols et dans le cortex d'altération des roches, calculées à partir des rapports molaires des teneurs totales des oxydes 2 à 2. Les suites sont les mêmes que ce soit calculé à partir des éléments simples ou de leurs oxydes.

D à S : sources bibliographiques, voir légende fig. 51

R : sesquioxydes R₂O₃ ≅ Al₂O₃ + Fe₂O₃ + .45 FeO (cf JENNY 1980:256); Cr₂O₃ etc. négligeables : si non précisé, calculé pour Fe₂O₃, généralement plus important

r : roche saine

r₁ : moyenne des serpentines selon KRAUSE 1958:764

r₂ : serpentine de Davos selon PETERS 1963:624,625

p₁ - p₄ : horizons du profil, suite de bas en haut

a : cortex altéré de la roche

c : roche altérée de l'horizon C

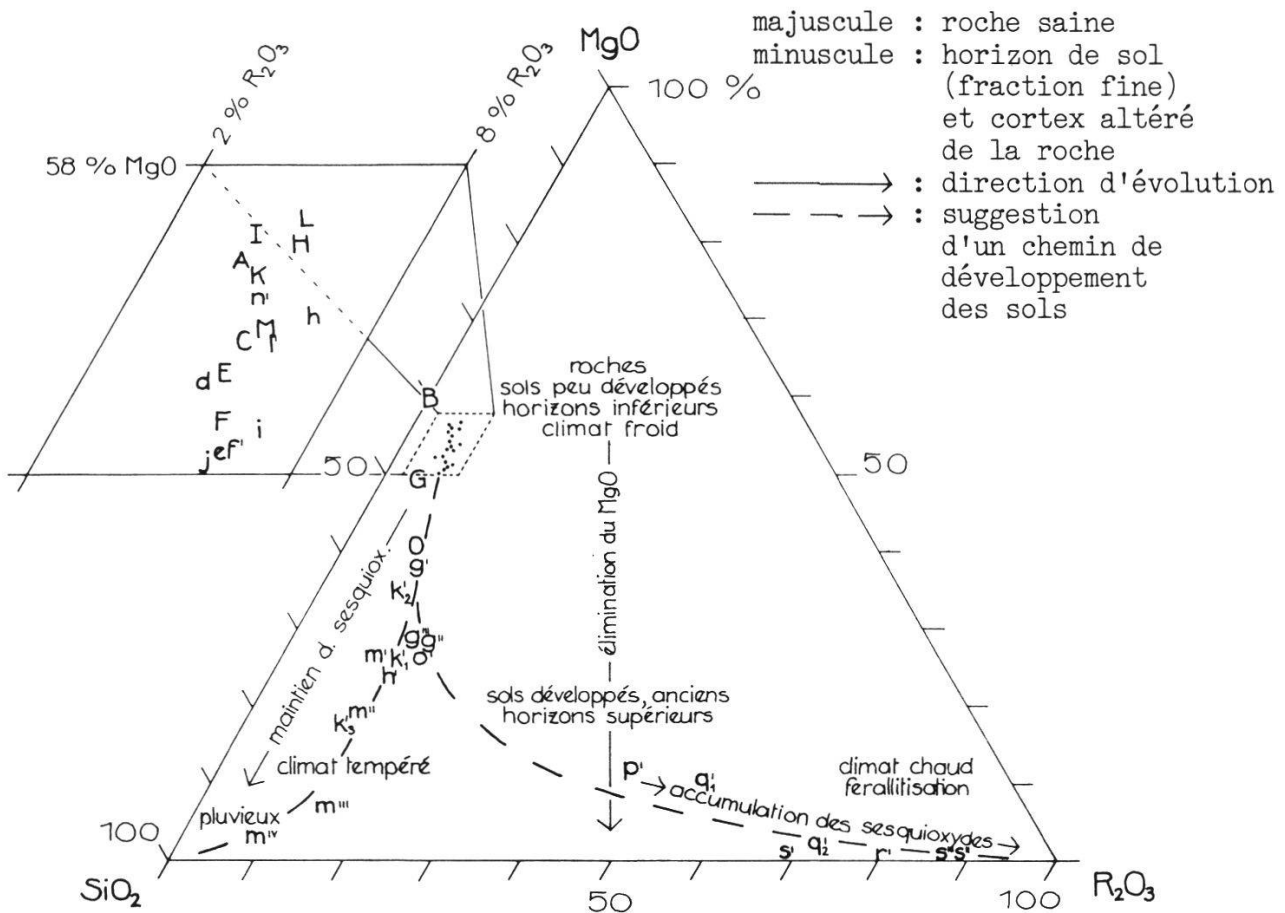


Fig. 51

Tendances de la pédogénèse sur serpentine, sur la base de l'évolution de la composition relative des constituants principaux magnésium/silice/sesquioxydes (R2O3), à partir des valeurs molaires des roches-mères serpentine et des sols en dérivant (complété d'après JENNY 1980:257).

Tendencies of soil genesis on serpentine on the basis of the evolution in the relative molar composition of the main constituents MgO/SiO₂/R₂O₃ (sesquioxides) from the parent-rock and soils derived from it (according to JENNY 1980: 257 completed).

capital : fresh rock

small : soil horizon (fine fraction) or weathered rock crust

—→ : direction of evolution

- - -→ : suggested path of soil development

auteur	échantillon	région	sol
A KRAUSE 1958:764		moyenne mondiale des serpentines	
B Si ₂ O ₅ Mg ₃ (OH) ₄		chrysotile	minéral
C PETERS 1963:624,5	TP 9, 20	Davos, Totalp	CH roche
D GEERING 1943:152		Maran, 2000 m	CH lithosol
E BRAUN-BL. 1951:237		Davos, Totalp	CH lithosol
F VERGER 1979:133	S-161	Aoste	I lithosol
G MENEZES 1969:122,128	EM 42	Portugal, NE	P ranker
H BERRE e.a. 1974:140,141	profil 1	Limousin	F s.brun eutrophe
I PEDRO e.a. 1966:615		Vosges	F s.brun
J PICHI 1948:17		Toscane	I
K RITTER 1963:112		Bosnie	J "rendzine/brun/parapodzol"
L ROBINSONe.a. 1935:19	6181a,b	Maryland	USA s.brun
M ROBINSONe.a. 1935:19,12	9607,9456-9	Maryland	USA s.brun
N ROBINSONe.a. 1935:11	7574	Californie	USA lithosol
O ROBINSONe.a. 1935:19,12	9930,9929	Oregon	USA
P JENNY 1980:257		Oregon	USA s.latéritique
Q ROBINSONe.a. 1935:11	2548,5891	Cuba	s.latéritique
R JENNY 1980:257		Bornéo	s.latéritique
S BIRREL e.a. 1945:73		Nouvelle Calédonie	s.latéritique

Le CO₂ s'avère un agent solubilisant du Mg extrêmement actif à l'égard des ultrabasites, comme il ressort des expériences de PEDRO e.a. 1966:647, voir p. 116 et de WILDMAN e.a. 1968a. Ces derniers ont analysé la dissolution de roches serpentinites de Californie pulvérisées, en suspension dans de l'eau à 25°C, enrichie en CO₂ jusqu'à 100 %, au cours d'un mois : les taux de dissolution de Mg et Si augmentent avec la concentration en CO₂, ce qui s'accorde avec les changements du pH. Selon les expériences semblables de LEBEDEVIA (e.a. 1978 ex BROOKS 1987:28), les bactéries nitrifiantes peuvent jouer un rôle semblable. La magnésite MgCO₃ est plus soluble que le calcaire CaCO₃ et moins que la dolomie CaMg(CO₃)₂; d'autant plus soluble que la pluviosité est élevée et les températures basses, car plus de CO₂ est susceptible d'être dissous dans l'eau (KRAPPENBAUER 1967:213). Beaucoup de Mg est présent sous forme échangeable : cet élément domine le complexe absorbant (p. 80) et encore plus fortement les eaux de percolation (CAFLISCH 1977:16).

Si la balance Mg/Ca dans la roche est d'abord en extrême défaveur de Ca, elle tend à s'améliorer avec la maturation des sols. A l'inverse cependant, dans les deux exemples de roche et cortex altérés, fig. 50, Ca est éliminé plus rapidement que Mg : pour se l'expliquer BERRE e.a. 1974:139 vont même jusqu'à envisager une néoformation à l'intérieur de la roche altérée à laquelle participerait Mg. Le Ca quant à lui se distingue par un comportement individualisé qui semble surtout refléter la remontée biologique manifeste dans les horizons supérieurs.

*

Il se dessine en outre sur serpentine deux pôles d'évolution selon le climat : en climat tempéré accumulation de silice avec maintien des sesquioxides, maintien qui parle plutôt pour la brunification et contre la podzolisation (p. 122); en climat tropical accumulation des sesquioxides jusqu'à l'exclusivité, c.-à-d. ferrallitisation, anciennement latéritisation (p.ex. JAFFRE 1980:158) conduisant à des concentrations jusqu'à plus de 75 % de Fe₂O₃ dans le sol (BROOKS 1987:22).

Le fer joue un rôle important dans la pédogénèse sur roches ferromagnésiennes. Ainsi la libération intense du Fe lors de l'altération amène VERGER (1979:137 climat froid) à parler d'"exsudation" de Fe; BERRE (e.a. 1974:142 climat tempéré) à parler de "ferruginisation", ses sols révélant une teneur en Fe₂O₃ libre de l'ordre de 15 %. Sous ces climats, le Fe libéré est assez rapidement immobilisé, principalement en lien avec la grande participation de Mg au complexe absorbant. En effet, l'altération progressive et incomplète typique de cette zone (DUCHAUFOR e.a. 1979:84) garantit un pH élevé. Or le Fe ne devient mobile qu'à pH bas. La forme ionique du Fe reste minoritaire : ainsi à l'étage alpin à Davos, le Fe échangeable reste en dessous des teneurs mesurables. Notons encore que dans les séquences d'élimination de la fig. 50, l'Al apparaît le plus souvent plus stable que le Fe (discussion Fe et brunification p. 123).

*

lieu	horizon	élimination relative	source	échant.
G Portugal, NE ranker	r → C * C → A ₁₂ A ₁₂ → A _n	K < Ti < Al < Cr < Fe < Ca < Si < Ni < Mn < Mg Mn < Cr < Al < Fe < Ni < Ti < Si < K < Mg < Ca Ca < K < Mn < Ti < Si < Mg < Ni < Fe < Cr < Al < Co	MENEZES 1969:133	EM 42
M Maryland sol brun profond	r → p ₁ p ₁ → p ₂ p ₂ → p ₃ p ₃ → p ₄	Ca < K < Al < P < Si < Fe < Ni < Cr < Mg Ca < P < K < Al < Ti < Si < Cr < Fe < Mg < Ni P < K < Ti < Al < Si < Fe < Ca < Cr < Ni < Mg Si < Ti < Cr < K < P < Al < Ni < Ca < Mg < Fe	ROBINSON e.a. 1935:19, 12	9607 9456-9

Fig. 52

Séquences des éliminations relatives dans 2 sols serpentiniques, voir légende fig. 50. Les Ti des séquences M diffèrent de ceux de la fig. 50 parce que pour ces éléments-ci les éliminations sont rapportées au Ti de l'horizon précédent.
Sequences of relative elimination in 2 serpentine soils. See legend fig. 50.

Les séquences d'éliminations relatives des deux profils des régions tempérées plutôt pluvieuses de la fig. 52 laissent entrevoir des accumulations relatives de K et P vers le haut du profil, qui avec Ca et éventuellement Ni sont vraisemblablement remontés par l'activité biologique, voir p. 82sq et 103. Sauf en haut du profil Ni est sinon éliminé plus rapidement que Cr, comme il ressort également de la séquence de JUCHLER 1988:74sq,137, cité p. 118. Ainsi les teneurs de Ni augmentent vers le bas du profil, alors que Cr atteint son maximum au milieu du profil, ce que décrit aussi RABENHORST 1982. Cette distribution inégale de Ni et Cr est en lien non seulement avec leur distribution spécifique suivant les minéraux et avec le sort de ceux-ci au cours de la pédogénèse, mais encore avec leurs formes différentes dans le sol et leur disponibilité différente par rapport aux plantes (discuté chez STICHER e.a. et JUCHLER 1988, p. 115, 117 et 31).

*

En résumé, l'évolution sur serpentine semble traîner en climat tempéré : le plus souvent les changements sont minimes entre roche et sol qui hérite des minéraux tels quels de la roche-mère, ce qui est sinon typique des climats froids et désertiques (voir déjà ROBINSON e.a. 1935:9,19 pour la Pennsylvanie et le Maryland). Il s'accumule une fraction constituée principalement d'oxydes de Fe libre et en moindre quantité d'amorphes, ce qui est typique des ferromagnésiens, à l'encontre de la plupart des autres substrats (DUCHAUFOR e.a. 1979:19).

La néoformation d'argiles, ici transformation progressive, fait exception. N'ont pas la preuve de néoformation, dans les sols bien drainés : STICHER e.a. 1986:285 pour l'étage subalpin de Davos (l'échantillon de Totalp cité par DUVIGNEAUD 1966:274 et PROCTOR e.a. 1975:261 comme exemple de la prépondérance des minéraux hérités, tiré des travaux d'IBERG 1954:97,119, est de la roche moulue); en climat tempéré BERRE e.a. 1974 pour le Limousin et LOPEZ e.a. 1984 pour la Galice, mais ces deux derniers décrivent des smectites dans les profils engorgés (voir aussi ISTOK e.a. 1982); alors que GARCIA e.a. 1980 décrit des néoformations pour la région de Malaga. PROCTOR o.c. et RABENHORST e.a. 1982:607,615 discutent brièvement les néoformations sur serpentine. Les argiles formées sont le plus souvent magnésiennes. DUVIGNEAUD 1966:273 et JENNY 1980:258 quant à eux vont même jusqu'à s'expliquer le caractère squelettique des sols serpentiniques par la néoformation retardée, à cause de la pauvreté de la roche en Al. La pédogénèse sur serpentine ne livrerait des argiles silicatées secondaires qu'à partir de l'Al, en provenance soit de la roche-mère, soit d'impuretés aluminées.

Remarquons que l'apport de minéraux étrangers, souvent plus riches en Al (ROBERT e.a. 1981:327), peut s'avérer non négligeable. GEERING 1943:153 cite JENNY 1926 qui enregistre des apports de 750 à 1850 g/m² par an, ce qui est du même ordre que le maximum de 1mm/an cité par FRANZ 1979:44. Aussi RABENHORST e.a. 1982:615, dans son schéma, comprend-il les apports éoliens comme partie intégrante de la genèse des sols serpentiniques du Maryland. Ce facteur complique souvent la compréhension des transformations prenant place dans les sols sur serpentine.

*

On peut donc formuler pour les sols bien drainés de la serpentine sans influences étrangères, en climat humide frais à tempéré, une altération caractérisée par :

- un Mg nettement plus mobile que le Si,
- des sesquioxydes relativement stables,
- une tendance pour la zone alpine vers une dissolution faible et congruente de tous les éléments,
- un comportement de Ca individualisé,
- l'absence de néoformation ou transformation progressive des argiles.

4.5.3 Brunification ou podzolisation sur serpentine

Rappelons que sur serpentine à l'étage alpin de Davos, la phase la plus développée des sols, la brunification des ranker, est liée à une situation colluviale (non engorgée). Or les sols colluviaux sont assez généralement plus ou moins brunifiés en climat tempéré (DUCHAUFOR e.a. 1977:201). Sur les silicates alpins voisins les sols les plus fréquents en milieu drainé sont des sols bruts et ranker jusqu'à des podzols et sols bruns, avec des sols intergrades entre ces derniers; et dans les combes à neige des stagnogleys. Les sols bruns s'y développent entre autres soit sur calcschistes, soit sur silicates influencés de dolomie, soit encore à partir de sols fossiles dégradés (résumé chez VETTERLI 1982:10). Sur les carbonates les sols évoluent des sols bruts aux rendzines.

Les caractéristiques des sols sur serpentine trouvés à Davos s'accordent bien également avec ce qui est connu de la pédogénèse sur roches silicatées plus généralement. Davos et l'Europe centrale et nordique font partie du domaine de pédogénèse par acidolyse du climat tempéré à froid assez humide, comprenant la pédogénèse par transformation en milieu plus ou moins acide typique des sols bruns et celle par solubilisation acidolytique typique des sols podzolisés, domaine où la matière organique joue un rôle moteur d'autant plus important que le climat est froid et humide (DUCHAUFOR e.a. 1977:22sq,289sq, 1979:69).

Les conditions favorables à la brunification sont un matériau de départ :

- riche en Fe
- riche en argiles fines.

On reconnaît un seuil des teneurs en ces éléments au-dessus duquel il y a brunification et au-dessous podzolisation, quel que soit le type de végétation (a.c.:1977:289; p. 29 et ci-dessus).

Alors que le degré de podzolisation est d'autant plus fort que le matériau de départ aluminosilicaté est :

- riche en quartz (à réaction d'autant plus acide)
- pauvre en Fe
- pauvre en minéraux altérables
- la litière acide (à C/N élevé)
- la pluviosité élevée et le climat froid (a.c.:335; 1979:68,86)
- le temps de formation long.

L'importance du Fe tient à sa capacité d'insolubiliser les agents organiques complexants. On peut d'ailleurs aborder la différence entre brunification et podzolisation sous l'angle particulier de la balance entre Fe et éléments complexants. Les acides organiques, toujours plus ou moins complexants, apparaissent en quantités très appréciables dès que le climat est froid et humide et d'autant plus que la litière est acide; par contre une forte activité biologique, telle dans le mull lié lui-même à une litière plutôt du type dit "améliorant" et typique des sols brunifiés, freine la formation de ces acides organiques. Or lorsqu'il y a beaucoup de matière organique complexante, il peut y avoir complexolyse, c.-à-d. migration des complexes mobiles chargés d'ions métalliques jusqu'à l'horizon B dit spodique où ils s'accumulent : il y a podzolisation. Par contre, lorsque le Fe en concentration suffisante arrive à empêcher la complexolyse, il peut y avoir brunification. En effet, en présence relative de peu d'agents complexants (solubles), le Fe lors de la libération par l'altération (par définition incomplète) est rapidement immobilisé sur place : il enrobe les particules d'argiles d'une fine pellicule et joue alors le rôle de cation de liaison entre argile et humus qu'il immobilise ainsi. Cela conduit à la formation de l'horizon d'altération (B) dit cambique des sols bruns, horizon qui doit sa couleur brune à la forme du Fe (a.c. 1977:289sq; 1979:20,59).

Ainsi sur les sols à minéraux phylliteux ferromagnésiens, la fraction organique a un turnover assez rapide, les matières premières et les acides humiques restent biodégradables, et l'ensemble du complexe organo-minéral demeure peu humifère (ROBIN e.a. 1981:344).

Parmi les seuils qui délimitent la brunification de la podzolisation, en plus d'une certaine teneur en Fe et en argile (voir p. 95), on reconnaît encore la proportion de Fe libre complexé mobile par rapport au Fe libre total lié aux argiles (sous les horizons organiques) : <10 % elle indique la brunification; > 10 % la podzolisation, ne serait-ce déjà que dans les sols ocres intergrades entre bruns et podzols. Ainsi dans les Vosges sur roches à $Fe_2O_3 > 2\%$ se développent des sols bruns, sur celles à $Fe_2O_3 < 2\%$ des podzols, et sur celles à Fe_2O_3 de 1.5 à 5.5 % des sols ocres podzoliques intermédiaires (SOUCHIER 1971 ex DUCHAUFOR e.a. 1979:87 et 1977:140,295,304; pour serpentine subalpine à Davos, JUCHLER 1988:50sq).

*

En outre, plusieurs rapports singuliers d'élimination relative lors de la pédogénèse ont été envisagés sous l'angle des processus en particulier autour de la podzolisation quasi en tant que rapports diagnostics.

Pour les aluminosilicates en milieu acidolytique, du moins à $pH < 4$, la silice a la plus faible solubilité de tous les éléments, alors que les bases et sesquioxides sont facilement entraînés. Le diagnostic touche donc des derniers. Ainsi $qBases < qAl$ (q =vitesse d'élimination) indique la podzolisation franche; et $qAl < qBases$ la podzolisation ménagée (DUCHAUFOR e.a. 1979:66sq). On a vu que sur serpentine on a le plus souvent $qAl < qFe < qMg$, fig. 50. L'Al libre est le plus souvent insignifiant, l'altération étant essentiellement ferrique et magnésienne (VERGER 1982:62).

Pour les ferromagnésiens PEDRO e.a. 1966:365,647sq suggèrent que l'élimination $qSi < qMg$ en conditions de drainage ou d'altération agressive en présence d'acides organiques, indique un processus de "podzolisation", bien que dans son exemple le Fe résiste à la mobilisation; alors que $qMg < qSi$ en présence d'eau pure ou carbonique indique un processus de "siallisation". Plus précisément WILDMAN e.a. 1968a a trouvé $qSi < qMg$ en hautes concentrations de CO_2 , et le rapport inverse en basses concentrations. Dans ces processus c'est surtout la solubilité de Mg qui change, celle de Si étant faible mais constante (DUCHAUFOR e.a. 1979:19). Cette qualification de "podzolisation" prête cependant à confusion, le destin déterminant des sesquioxides R n'y étant pas précisé. Il serait intéressant de savoir quels agents solubilisants sont en définitive les plus actifs dans l'altération des serpentines sur le terrain sous nos latitudes.

On peut se demander jusqu'à quel point la podzolisation sur serpentine pourrait commencer lorsque Mg est suffisamment éliminé (voir fig. 51), le rapport qui deviendrait déterminant serait alors celui entre Si et R, avec podzolisation au moment où $qSi < qR$.

*

Bref, vu la richesse en Fe, Mg et en minéraux altérables de la roche serpentine, ainsi que la pauvreté en quartz qui en fait une roche à caractère basique, on s'attend donc à trouver en zone tempérée et même froide, en milieu bien drainé et sans influences étrangères, surtout des sols brunifiés. C'est bien dans ce sens que convergent les travaux plus récents :

BERRE e.a. 1974	BE	Hte Vienne	F	370 m	
BIRSE 1982B	B	Ecosse	GB	0- 90 m	
COOMBE e.a. 1956b	R BE	Cornouailles	GB	90 m	légende :
GUITIAN e.a. 1980	B	Galice	E	300- 500 m	L lithosol
JAFFRE 1980	BE	Nlle Calédonie			R ranker
KANNO e.a. 1965a,b	BF3	Kyushu	J		B s.brun, brunifié
KOWALINSKI e.a. 1983	B,BF,BC	Basse Silésie	P		C cultivé
KRAPFENBAUER 1967:213	R	Bohême	A	400 m	F forestier
KRUCKEBERG 1969b:35	L R	NW USA		2300 m	E eutrophe
KRUCKEBERG 1985:101	B 4,5	Californie	USA	2800 m	M mésotrophe
LOPEZ e.a. 1984	B	Galice	E	300- 500 m	A acide
MENEZES 1969	L R	NE Portugal			O ocre podzolique
RABENHORST e.a. 1982:615	B 3	Maryland	USA	0- 200 m	1 régosol FAO
RAGG e.a. 1964	R	Rhum, Ecosse	GB	100 m	2 cambisol à mull acide FAO
ROBERTS 1980	R 1	Terre Neuve	C	0- 500 m	3 hapludalf USA
RUNE 1953	L	Scandinavie			4 ochrept USA
SASAKI e.a. 1968	B 4	Hokkaido	J		5 xeroll USA

SPENCE 1957	L	Shetland	GB	0- 150 m
STICHER 1981, e.a. 1986	BA	Davos	CH	1600-1800 m
VELASCO e.a. 1985	BA2	Galice	E	300- 500 m
VERGER 1979:134	L	Val d'Aoste	I	2600 m
VERGER 1982:64	BE EM O	Val d'Aoste	I	1600 m
WILSON 1969,e.a.1978:202sq	BE BF	NE Ecosse	GB	400- 500 m

Ces auteurs décrivent des sols de variété magnésienne allant des lithosols et ranker en direction des sols bruns; en milieu engorgé des gley. L'autre pôle de l'évolution, en direction des sols ferrallitiques en zone tropicale, est discuté par DUCHAUFOR e.a. 1979:87; JAFFRE 1980:158; BROOKS 1987:20sq; voir fig. 51.

Sur serpentine vont en direction de la podzolisation les sols où il y a :

- des apports suffisants en quartz étranger, p.ex. éolien
- une roche ultramafique relativement pauvre en Fe
- une roche ultramafique relativement pauvre en minéraux altérables et en particulier pauvre en Mg

et d'autres caractéristiques favorisant la podzolisation. On ne s'attend guère à des rendzines puisque celles-ci sont liées par définition à la présence de calcaire actif ou du moins de carbonates (RITTER 1963:112 cite une rendzine sur serpentine).

Ainsi VERGER 1982 décrit pour l'étage montagnard du Val d'Aoste un sol ocre podzologique jeune sur serpentinite, sur terrain à tendance colluviale, sous pinède d'éricacées. Il considère la podzolisation comme terme ultime de l'évolution pédologique sur serpentine, bien qu'elle soit rarement matérialisée. La roche-mère sous ce sol est pauvre en Mg. Rappelons que PEDRO e.a. 1966 attribuent au rôle tampon du Mg dans le milieu, la résistance au lessivage des sesquioxides et autres éléments.

STICHER 1975 décrit pour l'étage subalpin de Davos, en tant qu'exception, un podzol sur serpentine, également sous pinède à éricacées, où l'horizon cendreuse est constitué de phytolithes et de quartz d'origine éolienne.

Des ébauches d'évolution podzoliques sont signalées dans des régions bien arrosées, en Cornouailles par COOMBE e.a. 1956b, sur une serpentine influencée par du matériau d'origine granitique ou loessique; et en Ecosse occidentale par RAGG e.a. 1964, ses sols comportant un vrai horizon B d'accumulation par illuviation, mais des pH supérieurs à 5.5.

*

En conclusion, le schéma de la genèse des sols sur serpentinite du Maryland de RABENHORST e.a. 1982:615 (repris chez BROOKS 1987:27) pourrait plus généralement servir de modèle pour la pédogénèse sur serpentine sous climat froid et tempéré, allant des lithosols aux sols bruns. Partout le matériau de départ reste un facteur déterminant de la pédogénèse, justifiant la qualification de ces sols comme magnésiens ou même hypermagnésiens.