

VALEURS INDICATRICES DE LA VÉGÉTATION ET DES SOLS D'UNE MORAINÉ GRANITIQUE DE L'ÉTAGE SUBALPIN

VEGETATION AND SOILS ON A GRANITIC MORAINÉ IN THE SUBALPINE ZONE
DESCRIBED BY INDICATOR VALUES

par Rita BÜTLER¹ et France-Line DOMERGUE²

¹Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, IATE, Laboratoire de Gestion des écosystèmes, GR-Ecublens, CH 1015 Lausanne

²Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, IATE, Laboratoire de pédologie, GR-Ecublens, CH 1015 Lausanne

Résumé : Sur une moraine granitique à l'étage subalpin, une analyse des couvertures végétale et édaphique a été menée à une grande échelle afin de vérifier la sensibilité des valeurs indicatrices de LANDOLT (1977) dans un milieu homogène, c'est-à-dire ne comportant qu'un seul étage de végétation sur une roche-mère de composition uniforme avec une même durée d'évolution des sols.

Les valeurs indicatrices testées se sont révélées suffisamment sensibles pour différencier six groupes de végétaux sur les cinq hectares de la moraine étudiée; elles sont un outil efficace pour l'analyse statistique de la végétation, ainsi que pour estimer l'acidité, l'humidité, la teneur en humus, le rapport C/N et la granulométrie du sol.

Le type de lande subalpine, *Rhodoreto-Vaccinietum* et *Junipero-Arctostaphyletum uva-ursi*, est en relation avec le degré d'acidité et d'accumulation de la matière organique dans les différents faciès de podzols étudiés; le microrelief, induisant des microclimats fort variés, semble être l'un des facteurs principaux influençant la pédogenèse et la répartition des végétaux.

Mots-clés : relations sol - végétation, valeurs indicatrices, indices écologiques, moraine granitique, étage subalpin, lande, podzsol.

Abstract : The vegetation of a granitic moraine of the subalpine zone was analysed and the soils were described in order to test the sensibility of the indicator values of LANDOLT (1977). This study was made at a little scale in a homogeneous environment of five ha (vegetation zone, climate, parent material and soil evolution time). Some relationships between milieu, soil and vegetation were also studied.

The indicator values that we have tested were sensitive enough to differentiate between six vegetation groups found within the tested area. The values were efficient to analyse statistically the vegetation and also to estimate soil acidity, humidity, organic matter content, the C/N factor, and the soil texture. A significative relationship was observed between some subalpine dwarf shrub associations (*Rhodoreto-Vaccinietum* et *Junipero-Arctostaphyletum uva-ursi*), acidity degree and organic matter accumulation of the studied podzols. At the scale of the studied area, the microrelief leading to various kinds of microclimate seems to be one of the main factors affecting the pedogenesis and vegetation distribution.

Key words : soil - vegetation relationships, indicator values, granitic moraine, subalpine zone, dwarf shrub association, podzol.

1. INTRODUCTION

Les indices de Landolt (1977), qui relient chaque espèce végétale indigène à un milieu écologique idéal, permettent de caractériser une station par une série de paramètres quantitatifs à partir des végétaux qu'on y observe. Ces indices ont été utilisés surtout dans des études botaniques et géobotaniques pour comparer des sites qui diffèrent nettement entre eux par un facteur écologique déterminant, le climat par exemple, ou le type de sol; on ne les a par contre que rarement appliqués lorsque où les différences stationnelles sont minimales, ou si l'échelle de travail est grande. Egger (1994) les a utilisés pour caractériser des espèces végétales croissant sur un substrat homogène, la serpentine; avec une densité d'échantillonnage d'environ 30 relevés par km² (le site étudié, d'une surface de 3.5 km², se trouve à l'étage alpin entre 2200 et 2500 m d'altitude), cet auteur a pu détecter les groupes divergents de ceux à comportement semblable. A une échelle plus fine (densité maximale d'un relevé par hectare), Vetterli (1982) a obtenu une bonne correspondance entre les groupes de végétaux similaires issus des valeurs indicatrices et la classification selon les espèces sur un terrain de 56 ha se trouvant également à l'étage alpin (entre 2300 et 2550 m d'altitude).

Nous désirons tester la sensibilité de ces indices, c'est-à-dire voir quelles sont les possibilités d'obtenir des informations significatives si les différences stationnelles sont minimales et si l'échelle de travail est grande. Nous avons choisi un terrain dans un milieu aussi homogène que possible en ce qui concerne l'étage de végétation, le climat, la roche-mère et sa durée d'altération. Il est situé entre 1950 m et 2085 m d'altitude, d'une surface de seulement cinq hectares que nous avons prospectés avec une densité de dix relevés par hectare. Après avoir fait l'inventaire de la végétation, nous en établirons une classification puis nous appliquerons les indices écologiques aux différentes classes de végétation obtenues; nous tenterons alors de valider ces résultats par divers tests statistiques.

Après description et analyse des sols, nous tenterons de vérifier s'il y a effectivement correspondance entre l'information suggérée par certains des indices et quelques paramètres édaphiques.

Nous espérons ainsi contribuer à la compréhension des relations entre la végétation et les sols dans un écosystème encore peu connu et surtout peu étudié à cette échelle de travail : une moraine granitique à l'étage subalpin.

2. PRÉSENTATION DU TERRAIN

Le terrain d'étude se trouve au Val d'Arpette, dans le Massif du Mont-Blanc (Carte nationale de la Suisse 1/25000, feuille 1345; figure 1), dans une région localisée à la confluence de deux régimes climatiques, le régime atlantique du Bas-Valais et le régime continental du Valais Central (Hainard et Jacquemoud, 1975).

D'après l'Atlas géologique de la Suisse à 1/25000, feuille 1345 Orsières, la géologie du bassin versant est

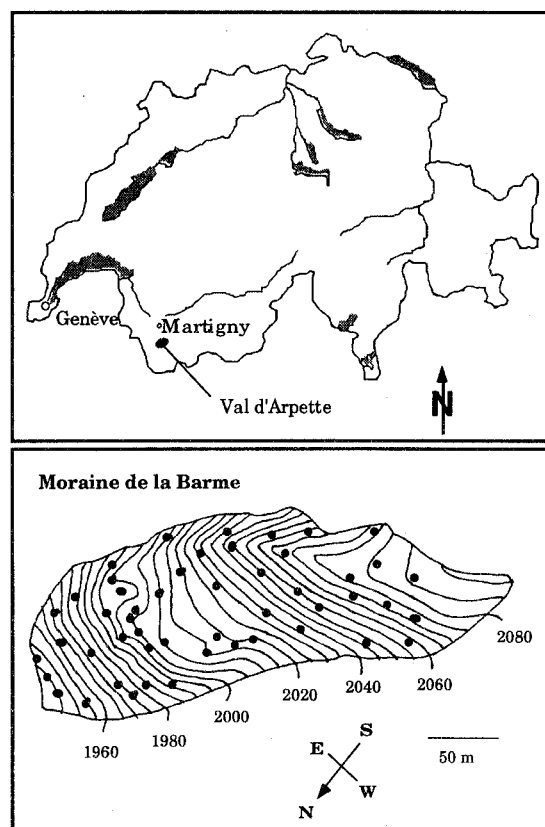


Figure 1 - Val d'Arpette et Moraine de la Barme : topographie et emplacement des carrés d'observation.

remarquablement homogène; le substrat est le granite du Mont-Blanc, porphyroïde ("protogine") et son faciès de bordure, équigranulaire, avec quelques filons de granites leucocrates. L'érosion et les glaciers ont remodelé le paysage de telle sorte qu'éboulis et moraines couvrent une grande partie des versants de la vallée. Plusieurs moraines tardi- et postglaciaires sont très bien conservées et ont fait l'objet d'une étude historique par Bless (1984). L'une d'entre elles, appelée par Bless la moraine de "La Barme", est notre terrain d'étude. D'une surface d'environ cinq hectares, elle est située entre 1950 et 2085 m d'altitude à l'étage subalpin au milieu de la vallée. Sa situation topographique et sa morphologie particulière pourraient indiquer deux (voire plusieurs) stades glaciaires à l'origine de sa formation. Nous estimons son âge entre 4000 et 6000 ans. Ses pentes sont fortes (entre 40 et 60 degrés), orientées au N, au NE et au SE. Le versant nord-est, marquant l'ancien front du glacier, atteint environ 50 m de hauteur. Du côté sud, la moraine se termine en plateau, grand champ de roches alimenté par des éboulements en provenance d'un flanc de la vallée. Environ à mi-hauteur de la moraine, on trouve un petit ressaut envahi par de très gros blocs rocheux.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Après examen au stéréoscope de photographies aériennes infrarouges (transformées en fausses couleurs),

Tableau II - Les six classes de végétation avec leurs caractéristiques stationnelles

| | classe a | classe b |
|--------------------------|---|--|
| nombre de carrés : | 35 | 5 |
| orientation : | N et NE | SE |
| pente : | 40 - 45° | 45 - 55° |
| associations végétales : | <i>Rhodoreto-Vaccinietum</i> , <i>Empetro-Vaccinietum</i> , <i>Larici-Cembretum vaccinietosum</i> | <i>Junipero-Arctostaphyletum uva-ursi</i> |
| espèces dominantes : | <i>Rhododendron ferrugineum</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Vaccinium gaultherioides</i> , <i>Empetrum nigrum ssp. hermaphroditum</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Calamagrostis villosa</i> , <i>Empetrum nigrum ssp. hermaphroditum</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Calamagrostis villosa</i> , <i>Juniperus communis ssp. nana</i> , <i>Larix decidua</i> , <i>Pinus cembra</i> , <i>Deschampsia flexuosa</i> , <i>Lonicera coerulea</i> , <i>Lycopodium annotinum</i> , <i>Melampyrum pratense</i> | <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> , <i>Vaccinium gaultherioides</i> , <i>Juniperus communis ssp. nana</i> , <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Laserpitium halleri</i> , <i>Melampyrum pratense</i> |
| diversité : | en moyenne 16.3 espèces | 15, 19, 21, 22 et 29 espèces |
| indices moyens : | R 1.77, F 2.92, H 4.15, N 2.01, D 3.97, L 2.90, T 2.39, K 2.63 | R 2.11, F 2.58, H 3.57, N 2.05, D 3.67, L 3.29, T 2.27, K 3.26 |
| pH (O) : | 3.6 à 4.45; horizon O plus acide que l'horizon sous-jacent | 4.5 à 5.2; horizon O moins acide que l'horizon sous-jacent |
| épaisseur (O) : | 4 - 33 cm | 2 - 4 cm |
| mat. org (O) : | 25 - 85 % | 26 - 58 % |
| C/N (O) : | 16 - 29 | ≥ 21 |
| humidité : | frais à humide, plus d'humidité en profondeur | sec |
| racines : | horizon O : nombreuses; horizon E/A : peu à très peu horizon BP : très peu | peu |
| remarques : | Tous les carrés les moins diversifiés (< 14 espèces) appartiennent à cette classe. Ce sont les sols les plus acides de la moraine. Très humifères, ils conservent bien l'humidité même après une longue période de sécheresse. Au printemps, la couche de neige y persiste longtemps. Selon les indices écologiques, l'intensité de lumière y est rarement élevée et le climat est du type subocéanique avec des écarts de température relativement faibles. | <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> domine nettement (coefficients 3 et 4). Ce sont les sols les moins acides de la moraine (avec ceux de la classe f). Les horizons O sont très minces et d'une couleur assez claire. Après des précipitations, ces sols sèchent vite; ils sont bien drainés, leur texture est sableuse. Au printemps, ils sont très tôt dégagés de la neige. Les indices révèlent un climat relativement continental. |

| | classe c | classe d |
|--------------------------|---|--|
| nombre de carrés : | 4 | 3 |
| orientation : | N et NE | S et SE |
| pente : | 45° | 0° - 30° |
| associations végétales : | <i>Rhodoreto-Vaccinietum</i> avec des espèces de <i>Adenostylo alliariae-Cicerbitetum alpinae</i> | espèces caractéristiques des classes a et b |
| espèces dominantes : | <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Rhododendron ferrugineum</i> , <i>Adenostyles alliariae</i> , <i>Agrostis schraderiana</i> , <i>Calamagrostis villosa</i> , <i>Dryopteris spinulosa</i> , <i>Gentiana purpurea</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> | <i>Juniperus communis ssp. nana</i> , <i>Rhododendron ferrugineum</i> , <i>Vaccinium gaultherioides</i> , <i>Deschampsia flexuosa</i> , <i>Melampyrum pratense</i> , <i>Calluna vulgaris</i> , <i>Gentiana purpurea</i> , <i>Larix decidua</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> |
| diversité : | 14, 23, 25 et 26 espèces | 18, 22 et 25 espèces |
| indices moyens : | R 2.15, F 3.03, H 3.90, N 2.31, D 3.87, L 3.11, T 2.29, K 2.49 | R 1.81, F 2.72, H 3.80, N 2.00, D 3.79, L 3.25, T 2.32, K 2.96 |
| pH (O) : | 4.3 à 4.6; horizon O et horizon sous-jacent à acidité égale | 4.05 à 4.3 |
| épaisseur (O) : | 2 - 8 cm | 3 - 7 cm |
| mat. org (O) : | 26 - 59 % | 25 - 35 % |
| C/N (O) : | ≤ 20 | 21 - 25 |
| humidité : | frais à humide, plus d'humidité en profondeur | sec |
| racines : | peu à beaucoup | peu |
| remarques : | La forte abondance de graminées et de fougères est caractéristique de cette classe. Les espèces dominantes de la classe a sont ici nettement moins abondantes. <i>Alchemilla xanthochlora</i> ne se trouve que dans cette classe. L'acidité des sols est modérée, la teneur en matière organique dans l'horizon O faible (peu épais et d'une couleur claire). Les rapports C/N sont les plus faibles. Deux des quatre colluviosols appartiennent à cette classe. | Située sur un petit plateau, cette classe contient des espèces caractéristiques de la classe a (orientation N, NE) et de la classe b (orientation SE). Ce sont les sols les moins profonds et (avec b) les plus secs. Ils sont nettement moins riches en matière organique que a. Selon les indices, ces stations sont un peu plus exposées à la lumière et soumises à un climat plus continental que la classe a. |

| | classe e | classe f |
|--------------------------|---|--|
| nombre de carrés : | 2 | 1 |
| orientation : | N et NE | SE |
| pente : | 45° et 35° | 45° |
| associations végétales : | <i>Nardetum alpigenum</i> avec des espèces de <i>Rhodoreto-Vaccinietum</i> et de <i>Empetro-Vaccinietum</i> | <i>Adenostylo alliariae-Cicerbitetum alpinae</i> |
| espèces dominantes : | <i>Nardus stricta</i> , <i>Leontodon helveticus</i> , <i>Rhododendron ferrugineum</i> , <i>Empetrum hermaphroditum</i> , <i>Vaccinium gaultherioides</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Diphasium alpinum</i> , <i>Gentiana purpurea</i> , <i>Homogyne alpina</i> , <i>Huperzia selago</i> , <i>Melampyrum pratense</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> | <i>Poa chaixii</i> , <i>Agrostis schraderiana</i> , <i>Silene vulgaris</i> . Seul carré avec des espèces de pelouse subalpine : <i>Geranium sylvaticum</i> , <i>Cirsium spinosissimum</i> , <i>Phleum alpinum</i> , <i>Peucedanum ostruthium</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Rumex arifolius</i> , <i>Geum montanum</i> , <i>Hypericum maculatum</i> |
| diversité : | 25 et 26 espèces | 30 espèces (diversité la plus élevée) |
| indices moyens : | R 1.83, F 2.86, H 3.91, N 1.94, D 3.85, L 3.42, T 2.15, K 2.83 | R 2.29, F 2.93, H 3.61, N 2.39, D 3.69, L 3.24, T 2.18, K 2.87 |
| pH (O) : | 4.1 - 4.5 | 5.05 |
| épaisseur (O) : | 2 - 5 cm | 7 cm |
| mat. org (O) : | - | 36% |
| C/N (O) : | 21 - 24 | 14 |
| humidité : | frais à sec | frais à sec |
| racines : | peu | nombreuses en surface, peu en profondeur |
| remarques : | Ce sont les deux seuls sites avec une présence importante de <i>Diphasium alpinum</i> , <i>Huperzia selago</i> et <i>Nardus stricta</i> . | C'est le seul site avec des espèces de pelouse subalpine. Le sol est parmi les moins acides (avec b), son rapport C/N est le plus faible. L'indice N est très élevé. |

nous avons établi un plan d'échantillonnage aléatoire systématique non stratifié (selon Wildi, 1986) de 50 carrés d'observation. Leur surface est de 25 m², superficie généralement admise pour des relevés phytosociologiques dans une lande (Ozenda, 1964, Mueller-Dombois et Ellenberg, 1974).

Dans chaque carré d'observation, nous avons procédé à un relevé floristique selon la méthode normalisée de Braun-Blanquet (1964), avec une estimation combinée de la dominance et de l'abondance de chaque espèce et nous avons creusé un profil pédologique pour la description du sol selon les directives de la FAO (1977), certaines d'entre elles ayant été adaptées à nos besoins (Bütler, 1995); un échantillon de chaque horizon a été prélevé.

La description de la couleur de la terre à l'état sec a été effectuée selon le système Munsell (Oyama et Takehara, 1987) sous conditions standard, le pH eau mesuré par potentiométrie, la teneur en matière organique des horizons O déterminée par calcination et, pour certains d'entre eux, les teneurs totales en carbone et en azote ont été dosées à l'analyseur Carlo Erba A 1108.

4. RÉSULTATS

4.1 Végétation

Les associations phytosociologiques principales sur la moraine sont, selon la classification de Braun-Blanquet (1964), *Rhodoreto - Vaccinietum*, *Junipero - Arctostaphyletum uva-ursi*, *Empetro-Vaccinietum* et *Larici-Cembretum vaccinietosum*. On y trouve également, mais moins bien représentées, *Nardetum alpigenum*, *Adenostylo alliariae-Cicerbitetum alpinae* et *Loiseleurio-Cetrarietum*. La couverture végétale est constituée essentiellement par la strate d'arbrisseaux nains (*Rhododendron ferrugineum*, *Vaccinium myrtillus* et *Vaccinium gaultherioides*) avec peu d'arbres (*Larix decidua* : quelques individus adultes, beaucoup de jeunes; *Pinus cembra* : un individu de taille supérieure à trois mètres, de nombreux de taille inférieure à un mètre; *Sorbus aucuparia*).

Au total, on a répertorié 83 espèces de végétaux vasculaires (tableau I), le nombre d'espèces par carré variant entre six et trente, la moyenne ainsi que la médiane étant de dix-huit.

Sept espèces sont presque omniprésentes, figurant dans plus de 90% des relevés : *Rhododendron ferrugineum*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium gaultherioides*, *Homogyne alpina*, *Gentiana purpurea*, *Melampyrum pratense* et *Deschampsia flexuosa*. Les quatre dernières ne couvrent cependant jamais de surfaces très importantes (rarement l'indice maximal de 2). Environ 70% des espèces ne figurent que dans 1 à 10 relevés.

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) (Wildi, 1986), fondée sur toutes les espèces répertoriées pondérées par leur coefficient d'abondance-dominance, a subdivisé la couverture végétale en six classes, notées dans la suite du travail a à f (figure 2 et tableau II). En premier lieu, on rencontre la lande à rhododendron et myrtilles, située sur le versant à orientation N/NE (70% des relevés, classe a). Sur le versant à orientation SE, elle est remplacée par la lande à raisin d'ours et genévrier nain (10% des relevés, classe b).

Quatre carrés à l'intérieur du versant N/NE forment classe distincte à cause de la présence de quelques espèces de la *mégaphorbiae* et d'une forte abondance de graminées et de fougères (8% des relevés, classe c). Sur un replat, on trouve trois carrés hébergeant à la fois les espèces typiques de la lande à rhododendron et myrtilles et celles de la lande à

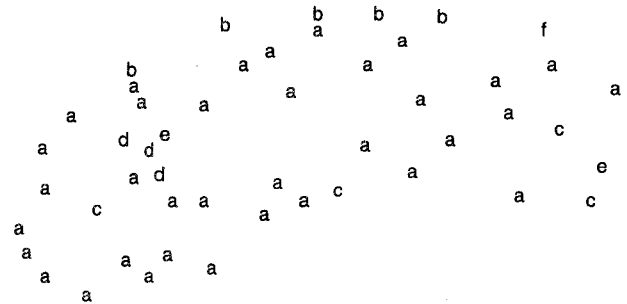


Figure 2 - Répartition des six classes de végétation.

raisin d'ours et genévrier nain (6% des relevés, classe d). Deux sites (classe e) se distinguent par une forte présence de la graminée *Nardus stricta*, de lycopes (*Diphysium alpinum* et *Huperzia selago*) et de *Leontodon helveticus*. Finalement, il y a un seul site où les espèces des deux landes subalpines ne sont pas présentes du tout, mais remplacées par des espèces de *mégaphorbiae* et de pelouse subalpine (classe f). Afin de vérifier si la plus grande classe qui contient 70% des relevés pouvait être subdivisée en sous-classes, nous l'avons soumise à une deuxième AFC, mais il n'a pas été possible de dégager une sous-structure, tant le degré de similitude de la végétation de ces carrés d'observation est élevé.

4.2. Sols

Sur la moraine de la Barne on trouve essentiellement (43 cas sur 50 relevés) des podzosols (A.F.E.S. 1995). Ils se présentent avec ou sans horizon éluvial E (lorsqu'il existe, il est de peu à très humifère), avec parfois un BPh nettement différencié. La variabilité morphologique de ces podzosols est considérable et elle est difficilement explicable par les facteurs classiques de la pédogenèse : la composition de la roche-mère et l'âge des sols peuvent être considérés comme constants, seules l'exposition et la couverture végétale sont nettement différentes pour quatre d'entre eux; pour les 39 autres, le paramètre pente varie, mais nous n'avons pas pu relier la morphologie du sol avec la déclivité du terrain. On peut donc penser qu'il s'agit de variabilité naturelle.

Nous avons également trouvé quatre COLLUVIOSOLS (A.F.E.S. 1992) avec un horizon Js; trois d'entre eux se sont formés en pente juste en-dessous d'un petit replat et le quatrième au bas d'un versant de la moraine. Sur le plateau rocheux, deux profils ont été rattachés à la classe des lithosols holorganiques. Un sol en pente forte (55°) a été identifié comme un RANKOSOL d'érosion (A.F.E.S. 1992), sa faible évolution étant certainement liée à sa situation topographique.

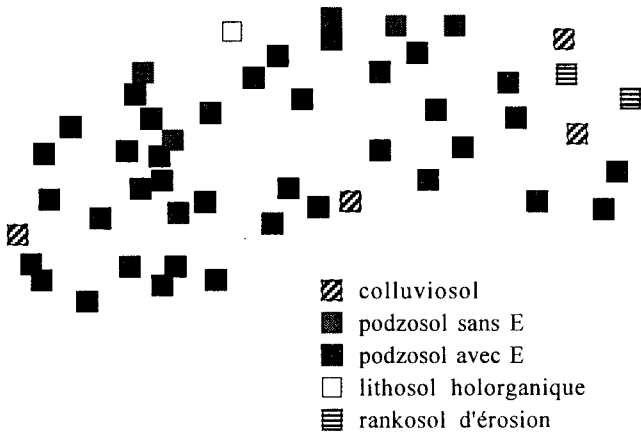


Figure 3 - Localisation des divers types de sols.

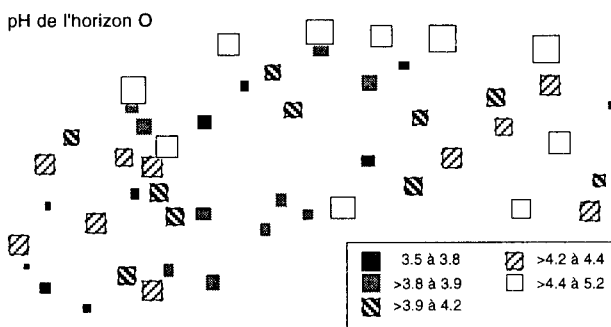


Figure 4 - pH des horizons de surface, la taille du carré étant proportionnelle au pH (compris entre 3.5 et 5.2).

- ▲ pH de l'horizon O < pH de l'horizon sous-jacent
- + pH de l'horizon O ~ pH de l'horizon sous-jacent
- ▽ pH de l'horizon O > pH de l'horizon sous-jacent

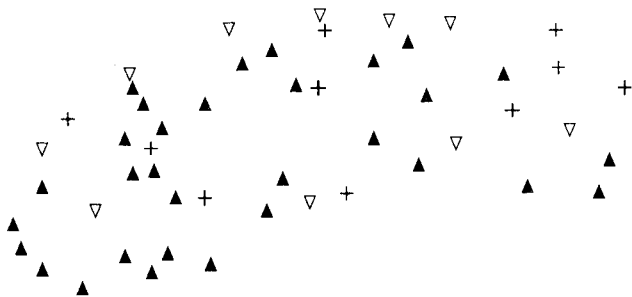


Figure 5 - Gradients de pH entre les horizons de surface et les horizons sous-jacents.

La figure 3 présente la distribution spatiale de ces différents types de sol.

Pour l'interprétation, on a attribué aux sols la classification découlant de la couverture végétale, en traitant les horizons homologues comme des unités, c'est-à-dire d'une part les horizons O, ensuite les horizons sous-jacents, qu'ils soient de type A, E ou Js (notés A-E dans la suite du texte) et finalement les horizons BP (BPH ou BPs ou BPhs).

Tous les sols sont très riches en éléments grossiers qui représentent en moyenne environ 40% du volume; au toucher, leur texture varie de sableuse à limono-sableuse. On y trouve peu de racines, si ce n'est dans les horizons O des carrés de la classe a, où elles sont très nombreuses. Les sols des carrés a et c sont frais à humides avec plus d'humidité en profondeur, ceux des carrés b et d sont secs, les autres frais à secs (début juin à fin septembre).

Tous les sols sur la moraine de la Barne sont acides à très acides (figure 4), présentant pour le pH des valeurs moyennes (et médianes) générales de 4.13 (4.05) pour l'horizon O, 4.30 (4.30) pour l'horizon A-E et de 4.50 (4.50) pour l'horizon BP. Plus on s'approche de la rochemère, moins la terre est acide et plus l'écart de pH par horizon devient faible : 1.6 unités pH pour l'horizon O, 1.05 unités pour l'horizon A-E et 0.65 unités pour l'horizon BP. Les sols des carrés a et b se distinguent aussi par leurs gradients de pH entre l'horizon O et l'horizon sous-jacent du type A-E (figure 5) : pour a, l'horizon O est en général plus acide que l'horizon sous-jacent et pour b le gradient est inversé. Les sols des carrés c ne montrent guère de variation de pH entre les deux horizons supérieurs (à l'exception d'un profil dont la végétation est - selon l'AFC - la plus proche de la classe a).

La teneur en matière organique des horizons O varie beaucoup sur l'ensemble de la moraine : entre 21% et 85% du poids sec (tableau II). En général, l'épaisseur de l'horizon O est liée à l'accumulation de la matière organique et en relation avec le pH (tableau VI). Il existe une forte corrélation entre le pH et la teneur en matière organique de l'horizon O (tableau VI). Tous les sols dont l'horizon O est très épais (compris entre 10 et 33 cm) sont orientés vers N/NE et appartiennent à la classe de végétation a. L'épaisseur de l'horizon O des autres classes est toujours inférieure à 10 cm (figure 6). Concernant l'épaisseur de l'horizon éluvial E, on observe également une très grande variabilité (figure 7). Sur le versant à orientation S/SE, l'horizon E est toujours absent (figures 3 et 7).

Le rapport entre les teneurs totales en carbone et en azote se situe entre 14 et 29 (tableau II). Les horizons O des carrés de classes c et f ont des rapports C/N ≤ 20, tandis que pour la classe b, C/N est toujours ≥ 21, mais les différences ne sont cependant pas significatives. Pour presque chaque paramètre mesuré, les sols des carrés de la classe a présentent une grande hétérogénéité.

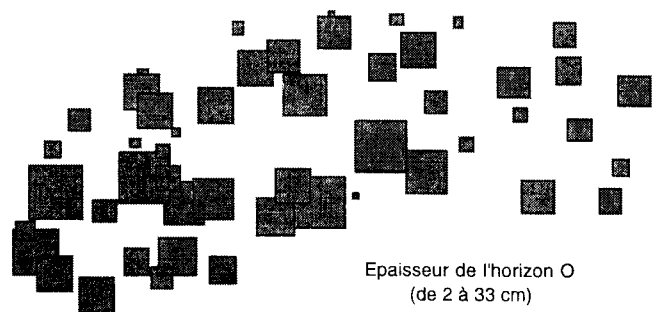


Figure 6 - Epaisseur des horizons de surface, la taille du symbole étant proportionnelle à la valeur de l'épaisseur.

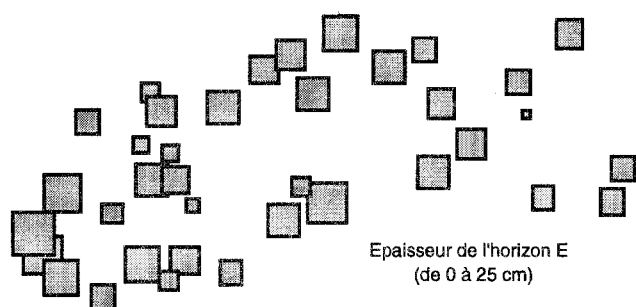


Figure 7 - Epaisseur des horizons E; la taille du symbole est proportionnelle à la valeur de l'épaisseur de E, un point indique son absence.

5. INTERPRÉTATION

Calcul des indices écologiques moyens, tests de sensibilité et de fiabilité

Les indices écologiques de Landolt (1977) caractérisent pour une espèce végétale donnée les conditions du milieu dans lequel elle prospère. Ce sont notamment l'indice de réactivité R, l'indice d'humidité F, l'indice d'humus H, l'indice de substances nutritives N (également appelé indice d'azote) et l'indice de dispersité D qui sont liés à certains paramètres du sol ainsi que l'indice de lumière L, l'indice de température T et l'indice de continentalité K qui caractérisent l'ensoleillement et le climat des différentes stations. Chaque indice varie entre 1 et 5 (chiffres entiers). Ayant à disposition la liste des végétaux croissant sur la moraine, nous pouvons donc attribuer facilement les huit indices à chaque espèce végétale et calculer ensuite, pour chacun des cinquante carrés, une moyenne de chaque indice pondérée par l'abondance de chaque espèce répertoriée, les coefficients de pondération provenant des coefficients d'abondance - dominance selon la transformation suivante : + devient 1, 1 devient 2, 2 devient 3 etc.; ces moyennes (50 x 8 valeurs) figurent sur le tableau III et la figure 8.

Nous avons également calculé une moyenne de chaque indice par classe de végétation (6 x 8 valeurs, tableau II) et une moyenne générale pour chaque indice pour l'ensemble de la moraine étudiée (8 valeurs : tableau III et figure 8). La moyenne générale nous renseigne sur les conditions écologiques du système naturel "moraine granitique-étage subalpin" tandis que les moyennes par classe et les moyennes par carré précisent l'information à l'intérieur du complexe morainique.

La moyenne générale de l'indice de réactivité R (1.85) indique des sols acides à très acides (les sols des classes b, c et f étant moins acides que ceux des classes a, d et e). Les sols sont modérément secs à humides, sans valeurs extrêmes (F : moyenne générale de 2.88), ceux des classes b et d étant nettement plus secs que les autres. La teneur en humus est élevée (H : moyenne générale de 4.03), les sols de la classe a étant bien plus humifères que les autres sols. En général, les sols sont pauvres en éléments nutritifs (N : moyenne générale de 2.04). Mais les classes c et f se distinguent des autres par leur richesse relative en nutriments. L'indice de dispersité D (moyenne générale de 3.91) indique, d'après Landolt, des sols pauvres en squelettes et assez bien aérés, ceux de la classe r étant caractérisés par des particules plus fines et un drainage plus lent que les autres. Selon l'indice de lumière L, les plantes

de la classe a reçoivent moins de lumière pendant leur période de croissance que les autres, notamment b et e. La température moyenne à laquelle la classe a est soumise pendant la période de végétation est légèrement plus élevée que celle des classes b, e et f. La classe b, notamment, ainsi que la classe d sont soumises à un microclimat plus continental que les autres classes (K plus élevé).

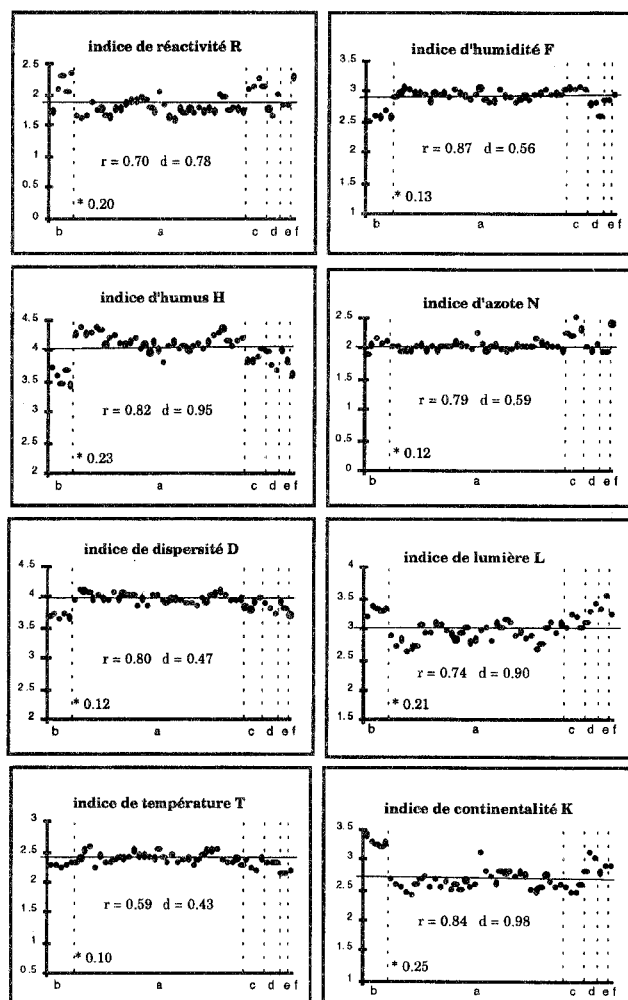


Figure 8 - Variations des indices écologiques moyens des carrés d'observation sur l'ensemble de la moraine de la Barne. K, H, L et R présentent une grande amplitude (l'écart-type ainsi que la différence entre les deux valeurs extrêmes sont grands) au contraire de T, N, D et F. (— : moyenne générale; r : coefficient de fiabilité de la classification; d : différence entre la moyenne la plus élevée et la plus basse; * : écart type.)

Elles subissent des différences de température annuelles et journalières importantes, et il y règne souvent une grande sécheresse atmosphérique.

L'amplitude de chaque indice (c'est-à-dire la différence entre la moyenne la plus élevée et la plus basse) est une mesure de la variabilité du facteur concerné au site étudié; elle est grande pour K, H, L, R (avec un écart-type ≥ 0.20) et faible pour T, N, D, F (écart-type ≤ 0.13). Ceci signifie que le microclimat, la teneur en humus des sols, l'intensité moyenne de lumière pendant la période de croissance et le pH du sol sont les paramètres qui varient nettement d'un site à l'autre sur la moraine de la Barne. Par contre, la température moyenne, la teneur en substances nutritives, la

Tableau III - Indices écologiques moyens des carrés d'observation, pondérés par le coefficient d'abondance-dominance de chaque espèce. Les moyennes de classe figurent sur le tableau II.

| carré | | R | F | H | N | D | L | T | K |
|-------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6 | classe a | 1,67 | 2,87 | 4,27 | 2,00 | 3,93 | 2,87 | 2,33 | 2,67 |
| 7 | | 1,62 | 2,95 | 4,38 | 2,00 | 4,10 | 2,71 | 2,38 | 2,57 |
| 8 | | 1,65 | 3,04 | 4,27 | 1,92 | 4,08 | 2,81 | 2,50 | 2,54 |
| 9 | | 1,86 | 3,00 | 4,29 | 1,95 | 4,05 | 2,62 | 2,57 | 2,43 |
| 10 | | 1,73 | 2,95 | 4,36 | 1,95 | 3,95 | 2,68 | 2,23 | 2,41 |
| 11 | | 1,77 | 2,96 | 4,32 | 2,00 | 4,00 | 2,69 | 2,42 | 2,58 |
| 12 | | 1,67 | 2,92 | 4,08 | 2,04 | 3,96 | 3,04 | 2,33 | 2,67 |
| 13 | | 1,63 | 2,83 | 4,21 | 1,96 | 3,92 | 2,92 | 2,33 | 2,71 |
| 14 | | 1,77 | 2,95 | 4,23 | 2,00 | 4,05 | 2,91 | 2,36 | 2,55 |
| 15 | | 1,76 | 2,92 | 4,12 | 1,96 | 3,96 | 3,08 | 2,40 | 2,68 |
| 16 | | 1,85 | 2,96 | 4,08 | 2,00 | 4,04 | 3,04 | 2,38 | 2,54 |
| 17 | | 1,89 | 2,89 | 4,14 | 2,00 | 4,00 | 2,96 | 2,39 | 2,61 |
| 19 | | 1,90 | 3,00 | 4,20 | 2,00 | 4,00 | 2,90 | 2,50 | 2,50 |
| 21 | | 1,96 | 2,96 | 4,04 | 2,08 | 3,85 | 2,81 | 2,42 | 2,58 |
| 22 | | 1,91 | 2,91 | 4,09 | 2,04 | 3,96 | 2,91 | 2,43 | 2,48 |
| 23 | | 1,80 | 2,85 | 3,95 | 2,00 | 3,85 | 3,00 | 2,40 | 2,65 |
| 24 | | 1,72 | 2,93 | 4,14 | 1,97 | 4,00 | 2,76 | 2,38 | 2,55 |
| 25 | | 2,06 | 3,03 | 4,00 | 2,25 | 4,00 | 2,81 | 2,53 | 2,56 |
| 30 | | 1,81 | 2,85 | 3,81 | 2,07 | 3,93 | 2,96 | 2,41 | 3,11 |
| 31 | | 1,63 | 2,79 | 4,05 | 1,95 | 3,89 | 3,00 | 2,32 | 2,79 |
| 32 | | 1,58 | 2,83 | 4,13 | 2,00 | 3,96 | 2,79 | 2,46 | 2,71 |
| 33 | | 1,76 | 3,00 | 4,04 | 2,04 | 3,96 | 3,08 | 2,32 | 2,60 |
| 34 | | 1,69 | 2,90 | 4,07 | 1,97 | 3,93 | 3,00 | 2,34 | 2,79 |
| 35 | | 1,77 | 2,88 | 4,00 | 1,96 | 3,88 | 3,12 | 2,38 | 2,77 |
| 36 | | 1,68 | 2,81 | 4,06 | 1,97 | 3,87 | 3,10 | 2,26 | 2,81 |
| 37 | | 1,79 | 2,86 | 4,10 | 2,03 | 3,86 | 2,86 | 2,34 | 2,69 |
| 38 | | 1,72 | 2,90 | 4,03 | 2,00 | 3,97 | 2,94 | 2,45 | 2,77 |
| 42 | | 1,77 | 2,84 | 4,13 | 2,00 | 3,90 | 2,84 | 2,50 | 2,72 |
| 43 | | 1,71 | 2,92 | 4,25 | 2,00 | 4,00 | 2,88 | 2,50 | 2,50 |
| 44 | | 2,00 | 2,96 | 4,29 | 2,14 | 4,04 | 2,64 | 2,54 | 2,46 |
| 45 | 1,96 | 3,00 | 4,35 | 2,09 | 4,09 | 2,74 | 2,35 | 2,52 | |
| 46 | 1,73 | 2,93 | 4,17 | 2,03 | 4,00 | 3,00 | 2,33 | 2,73 | |
| 47 | 1,79 | 2,96 | 4,07 | 2,00 | 3,93 | 3,11 | 2,32 | 2,61 | |
| 49 | 1,76 | 2,93 | 4,17 | 2,00 | 3,93 | 2,93 | 2,38 | 2,52 | |
| 50 | 1,71 | 3,00 | 4,18 | 1,96 | 3,96 | 3,07 | 2,25 | 2,57 | |
| 1 | classe b | 1,72 | 2,50 | 3,72 | 1,89 | 3,67 | 3,17 | 2,28 | 3,39 |
| 2 | | 2,07 | 2,60 | 3,57 | 2,03 | 3,70 | 3,37 | 2,27 | 3,27 |
| 3 | | 2,33 | 2,56 | 3,46 | 2,15 | 3,63 | 3,33 | 2,22 | 3,22 |
| 4 | | 2,06 | 2,66 | 3,67 | 2,06 | 3,72 | 3,25 | 2,25 | 3,19 |
| 5 | | 2,36 | 2,56 | 3,43 | 2,11 | 3,64 | 3,33 | 2,31 | 3,25 |
| 20 | classe c | 2,09 | 3,04 | 3,83 | 2,26 | 3,83 | 3,00 | 2,35 | 2,52 |
| 39 | | 2,13 | 3,00 | 3,83 | 2,19 | 3,77 | 3,23 | 2,23 | 2,45 |
| 40 | | 2,26 | 3,06 | 3,90 | 2,48 | 3,90 | 3,19 | 2,19 | 2,42 |
| 48 | 2,13 | 3,00 | 4,03 | 2,30 | 3,97 | 3,00 | 2,37 | 2,57 | |
| 26 | classe d | 1,77 | 2,77 | 3,97 | 2,00 | 3,87 | 3,10 | 2,30 | 2,80 |
| 27 | | 1,67 | 2,79 | 3,78 | 1,96 | 3,79 | 3,25 | 2,33 | 3,08 |
| 28 | | 2,00 | 2,59 | 3,66 | 2,05 | 3,72 | 3,41 | 2,33 | 3,00 |
| 18 | classe e | 1,83 | 2,86 | 4,00 | 1,94 | 3,91 | 3,31 | 2,14 | 2,77 |
| 29 | | 1,82 | 2,85 | 3,82 | 1,94 | 3,79 | 3,52 | 2,15 | 2,88 |
| 41 | classe f | 2,29 | 2,93 | 3,61 | 2,39 | 3,69 | 3,24 | 2,18 | 2,87 |
| | moyenne générale | 1,85 | 2,88 | 4,03 | 2,04 | 3,91 | 3,01 | 2,35 | 2,71 |

granulosité ainsi que l'humidité des sols sont relativement uniformes.

Nous avons ensuite soumis toutes les moyennes de classe à un test de comparaisons multiples, le test H.S.D. de Tukey (Scherrer, 1984), avec une erreur α de 0.05, afin de vérifier si les différences entre les moyennes de classe sont

Tableau IV - Indices écologiques présentant des différences significatives entre les six classes de végétation. Ce sont les classes a (orientation N/NE) et b (orientation SE) qui se distinguent le plus nettement.

| classes | a | b | c | d | e | f |
|---------|---|-------------|-------|-------|------|------|
| a | | RFHL DKT | RFHN | FHLDK | LT | RHND |
| b | | | FHNDK | RFK | FHDK | FN |
| c | | | | RFNK | FNK | |
| d | | | | | | RN |
| e | | | | | | N |

significatives. Malgré la sévérité du test appliqué dans le traitement des classes contenant peu d'individus, 13 paires de classes sur 15 se distinguent par au moins un facteur (tableau IV). Ce résultat démontre la bonne sensibilité des indices écologiques qui décrivent donc avec succès les différences stationnelles des classes de végétation. Il ressort nettement de ce test que c'est l'orientation topographique qui entraîne les différences les plus marquées : des différences significatives dans les moyennes de sept indices sur huit distinguent la classe b, orientée au SE de la classe a, orientée au N/NE.

Afin de tester si la classification déterminée par l'analyse de la couverture végétale (AFC) se retrouvait dans les moyennes des indices écologiques, on a appliqué un test proposé par Webster et Oliver (1990), test où l'on compare la variance entre les classes à la variance à l'intérieur des classes (tableau V; le facteur n_w permet de tenir compte du fait que chaque classe compte un nombre d'individus différents). Le calcul de la corrélation intraclasse r fournit une mesure de la pertinence (et donc de la fiabilité) de la classification. Le coefficient r maximal est de 1, si chaque classe est uniforme. Pour un système naturel, $r > 0.6$ peut déjà être considéré comme révélateur d'une bonne classification (R. Webster, communication personnelle).

Les coefficients r , calculés pour les huit indices écologiques, sont tous supérieurs à 0.6, sauf pour l'indice T (tableau V) : la classification issue de l'AFC de la liste d'espèces est donc parfaitement justifiée. Ce résultat affirme que la réduction de 83 variables (espèces) à 8 (indices) n'entraîne pas (ou fort peu) de perte d'information. En plus, il confirme que les indices sont suffisamment sensibles pour une application dans ce milieu homogène et à l'échelle choisie.

On peut également tester la sensibilité et la fiabilité des indices écologiques par une analyse en composantes principales (ACP) selon Wildi, 1986. Nous l'avons effectuée avec les moyennes par carré des indices écologiques et nous avons retrouvé les mêmes classes de végétation, même si ce traitement statistique s'est fait à un degré d'abstraction supérieur à l'AFC qui était basée sur les listes d'espèces de chaque carré. Ceci confirme une nouvelle fois la parfaite description de la couverture végétale par les indices écologiques.

Information des indices écologiques comparée aux données stationnelles

Après avoir vérifié que, même à l'échelle à laquelle nous avons travaillé, les indices écologiques décrivent de façon précise la couverture végétale, nous nous sommes intéressés aux relations entre les données stationnelles des différents sites sur la moraine. Nous avons calculé les corrélations linéaires entre deux variables quantitatives

d'après Pearson pour les paramètres suivants : pH, épaisseur, teneur en matière organique et rapport C/N des horizons O, indices écologiques (F, R, N, H, D, L, T et K) et diversité floristique (nombre d'espèces par carré d'observation) avec $n = 50$ et pour C/N $n = 24$. Ensuite, toutes les hypothèses ont été soumises à un test de signification de la corrélation de Pearson : avec une marge d'erreur de 0.01, un coefficient de corrélation $r \geq 0.36$ est significatif pour $n = 50$ et un coefficient $r \geq 0.51$ est significatif pour $n = 24$ (tableau VI).

On peut distinguer entre trois types de corrélations : celles entre les paramètres pédologiques mesurés, celles entre les indices écologiques et celles entre les paramètres pédologiques et les indices écologiques qui décrivent les relations entre la végétation et le sol.

En général, les indices écologiques présentent de bonnes corrélations entre eux. Deux milieux principaux sont opposés, caractérisés comme :

- acide, humifère, mal drainé/aéré, humide, peu ensoleillé, pauvre en substances nutritives, océanique sur le versant N/NE de la moraine;
- moins acide, peu humifère, bien drainé/aéré, sec, bien ensoleillé, relativement riches en substances nutritives, continental sur le versant SE de la moraine.

Cette logique concerne la moraine dans son ensemble et ne se trouve pas forcément au niveau de tous les sites échantillonnés.

Certains paramètres pédologiques sont également corrélés entre eux. Les deux types de sol, correspondant aux milieux mentionnés, sont :

- un podzsol acide, riche en matière organique, horizon O épais, rapport C/N élevé;
- un podzsol moins acide, relativement pauvre en matière organique, avec un horizon O mince, de rapport C/N faible et sans horizon E.

Ce qui est particulièrement important, c'est de savoir si les indices qui caractérisent les qualités du sol (F, R, N, H, D) reflètent bien la réalité.

Il n'existe qu'un seul indice, l'indice R, qui peut être directement comparé à un paramètre pédologique, à savoir le pH de l'horizon de surface, zone prospectée par les racines. La forte corrélation de 0.74 entre ces deux paramètres confirme la bonne sensibilité et la fiabilité de l'indice R. Les classes de végétation se reflètent très nettement dans les valeurs de pH des horizons O, fait qui est indiqué par le coefficient r de Webster de 0.70 (tableau V).

Contrairement à l'indice R qui décrit directement le pH du sol, les indices H, D, N et F sont difficiles à estimer pour le pédologue. Selon Landolt (1977), H est caractéristique à la fois de la teneur du sol en humus et de la qualité de cet humus. Nous avons confronté H à la teneur en matière organique de l'horizon organique du sol, sans tenir compte de la qualité de l'humus, et obtenu une corrélation $r = 0.43$, corrélation significative, mais moins élevée que pour le couple R-pH.

L'indice D, qui, d'après Landolt, caractérise la grosseur des particules et l'aération du sol est dans notre cas fortement corrélé à H et semble donc décrire surtout l'horizon organique.

L'indice N caractérise la teneur en substances nutritives (surtout l'azote) du sol (Landolt, 1977). Pour les sols acides, riches en humus, l'azote est le facteur principal

limitant la production végétale. Pourtant, il serait faux de confronter l'indice N à la teneur totale en azote du sol, car les plantes n'assimilent que l'azote ammoniacal (non fixé par les argiles et non immobilisé par les micro-organismes) et l'azote nitrique.

Les espèces de mull (par exemple *Poa chaixii*) peuvent s'alimenter à partir d'azote ammoniacal ou nitrique, tandis que les acidophiles et les caractéristiques du mor (par exemple *Calluna vulgaris* et *Vaccinium myrtillus*) sont moins exigeantes en azote et se contentent de la forme ammoniacale (Bonneau et Souchier, 1994). N'ayant pas dosé les formes d'azote disponible pour la végétation, nous avons confronté l'indice N au rapport C/N et observé une corrélation de -0.73.

Les valeurs de l'indice F indiquent la présence de sols à teneur en humidité différente, ce que nous avons effectivement observé sur le terrain. Mais il est difficile de quantifier la relation F-humidité du sol, car les profils ont été creusés dans des conditions météorologiques fort variables et nous n'avons pas mesuré le degré d'humidité du sol.

Ces corrélations entre paramètres pédologiques et indices écologiques se sont révélées significatives uniquement au niveau de l'horizon superficiel, mais ceci n'est pas étonnant, et pour plusieurs raisons. C'est le seul horizon qui est bien prospecté par les racines : c'est donc là que les plantes s'approvisionnent en eau et en éléments nutritifs; il semble donc normal d'y trouver davantage de concordance entre les indices écologiques et la qualité du sol que dans les horizons plus profonds dans lesquels on n'a observé que fort peu de racines. De plus, l'humus de l'horizon superficiel est peu évolué : il doit conserver une bonne partie des propriétés chimiques de la litière et donc, à moins d'une évolution rapide de la végétation, être en relation étroite avec la composition de la couverture végétale. En outre, étant donné l'homogénéité du substrat, il n'est pas étonnant que les horizons profonds ne montrent que fort peu de différences physico-chimiques d'un site à un autre et que l'on n'observe pas de relations avec des indices reflétant les conditions écologiques à l'interface sol-atmosphère.

Les autres indices ne peuvent pas être comparés à un paramètre quelconque de la qualité du sol, mais K et L correspondent bien avec la situation topographique déterminant l'exposition. T se révèle intéressant pour la comparaison avec d'autres milieux, mais n'apporte presque rien pour la différenciation d'un site donné à notre échelle de travail.

Le grand nombre de bonnes corrélations montre donc que les indices écologiques peuvent être d'une grande utilité pour décrire, à l'échelle de travail donnée, les caractéristiques du sol et de la station.

Valeur d'un relevé floristique simplifié

Nous avons également testé le cas où l'on répertorie uniquement les espèces végétales dominantes, approche qui nous a semblé intéressante car elle pourrait être adoptée sur le terrain par une personne qui n'a pas une connaissance approfondie de la botanique ou lors de l'interprétation d'une photographie aérienne. Selon Legros et Cabidoche (1977), les changements fréquents et importants de végétation, végétation, de microclimats et de formes géomorphologiques, c'est-à-dire autant de facteurs nettement visibles sur le terrain et sur une photo aérienne,

Tableau V - Calcul de la fiabilité de la classification pour obtenir le coefficient r de Webster qui, s'il est supérieur à 0.60, indique une bonne classification.

| | |
|---|---|
| variance à l'intérieur des classes: (σ^2_W) | $n_w = \frac{1}{k-1} \left\{ N - \frac{\sum_{j=1}^k n_j^2}{N} \right\}$ |
| variance entre les classes: ($n_W \sigma^2_B + \sigma^2_W$) | |
| corrélation intraclasse: $r = \frac{\sigma^2_B}{\sigma^2_W + \sigma^2}$ | $k =$ nombre de classes |
| appelé par la suite coefficient r de Webster | $N =$ nombre total d'individus |
| | $n_j =$ nombre d'individus dans la classe j |

| Paramètre | r de Webster pour six classes de végétation |
|---|--|
| indice de réactivité R | 0.70 |
| indice d'humidité F | 0.87 |
| indice d'humus H | 0.82 |
| indice de substances nutritives N | 0.79 |
| indice de dispersité D | 0.80 |
| indice de lumière L | 0.74 |
| indice de température T | 0.59 |
| indice de continentalité K | 0.84 |
| nombre d'espèces par carré | 0.54 |
| pH de l'horizon O | 0.79 |
| pH de l'horizon sous-jacent E/A | 0.56 |
| pH de l'horizon BP | 0.48 |
| épaisseur de l'horizon O | 0.45 |
| teneur en matière organique (horizon O) | 0.33 |
| C/N de l'horizon O | 0.37 |

Tableau VI - Coefficients r de corrélation linéaire de Pearson calculés pour l'ensemble de la moraine de la Barne (n = 50; * n = 24). Corrélations significatives (**en gras**) : pour n = 50 si r ≥ 0.36 et pour n = 24 si r ≥ 0.51. Légende : ép. O : épaisseur de l'horizon O; pH : pH de l'horizon O; m.o. : teneur en matière organique de l'horizon O; C/N : rapport entre la teneur totale en carbone et azote de l'horizon O; F : indice d'humidité; R : indice de réactivité; N : indice de substances nutritives; H : indice d'humus; D : indice de dispersité; L : indice de lumière; T : indice de température; K : indice de continentalité; div. : nombre d'espèces par carré.

| | ép. O | pH | m.o. | C/N * | F | R | N | H | D | L | T | K | div. |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------|
| ép. O | | | | | | | | | | | | | |
| pH | -0,65 | | | | | | | | | | | | |
| m.o. | 0,61 | -0,74 | | | | | | | | | | | |
| C/N * | 0,37 | -0,45 | 0,51 | | | | | | | | | | |
| F | 0,40 | -0,46 | 0,15 | -0,38 | | | | | | | | | |
| R | -0,37 | 0,74 | -0,48 | -0,57 | -0,15 | | | | | | | | |
| N | -0,17 | 0,46 | -0,38 | -0,73 | 0,26 | 0,79 | | | | | | | |
| H | 0,57 | -0,74 | 0,43 | 0,15 | 0,66 | -0,64 | -0,34 | | | | | | |
| D | 0,56 | -0,66 | 0,31 | 0,07 | 0,75 | -0,51 | -0,19 | 0,90 | | | | | |
| L | -0,57 | 0,60 | -0,41 | 0,05 | -0,54 | 0,41 | 0,12 | -0,82 | -0,75 | | | | |
| T | 0,40 | -0,42 | 0,27 | 0,12 | 0,29 | -0,27 | -0,14 | 0,46 | 0,55 | -0,69 | | | |
| K | -0,35 | 0,50 | -0,17 | 0,36 | -0,89 | 0,20 | -0,14 | -0,77 | -0,75 | 0,63 | -0,35 | | |
| div. | -0,43 | 0,59 | -0,51 | -0,44 | -0,25 | 0,60 | 0,46 | -0,58 | -0,49 | 0,57 | -0,48 | 0,32 | |

induisent une forte diversité des sols à l'étage subalpin. Afin de contrôler la valeur prévisionnelle des indices simplifiés, nous avons recalculé les indices moyens par carré en ne tenant compte que des espèces les mieux représentées (avec coefficients d'abondance-dominance ≥ 2 ; catégorie minimale entre 1/20 et 1/4 de recouvrement). Dans ce cas, les coefficients de pondération sont égaux aux coefficients d'abondance-dominance (2 reste 2, 3 reste 3 etc.). L'effet sur la moyenne générale, sur l'écart-type et le coefficient r de Webster n'est pas pareil pour tous les indices.

La moyenne générale reste plus ou moins constante pour D, K, N et F (± 0.03 unités); elle augmente considérablement pour H (+ 0.33 unités) et elle s'abaisse pour R (- 0.15 unités), T (- 0.12) et L (- 0.10). L'écart-type augmente pour H (0.28 unités), K (0.17), R (0.14), D (0.13), F (0.10), T (0.09) et L (0.07). Il s'abaisse légèrement pour N (0.04). Pour tous les indices, la différence entre la moyenne de carré la plus élevée et la plus basse augmente beaucoup (1.22 unités pour R, 1.05 pour H, 1.02 pour K, 0.82 pour D, 0.44 pour F, 0.34 pour L, 0.24 pour T et 0.11 pour N).

6. DISCUSSION ET CONCLUSION

Influence de la topographie sur le système végétation-sol.

Malgré la petite taille de la surface étudiée et l'homogénéité relative du milieu (climat, altitude, âge des sols, roche-mère), la moraine de la Barme héberge plusieurs classes de végétation. La topographie est le facteur principal déterminant la répartition des végétaux et des sols. Sur le versant à orientation SE, la couche protectrice de neige disparaît très tôt au printemps. Seules les plantes qui supportent de grandes variations de température et la sécheresse atmosphérique peuvent s'y installer. Suite à l'ensoleillement important, la température du sol augmente rapidement au printemps et accélère la décomposition de la matière organique. Les horizons des sols de ce versant sont peu épais et le pH de l'horizon organique est relativement élevé. Sur le versant à orientation N/NE, l'accumulation de la matière organique est considérable (jusqu'à 35 cm), car le processus de décomposition est très ralenti par le microclimat défavorable et le pH très acide. Les différents gradients de pH qu'on a observés dépendent donc essentiellement de l'orientation.

Le microrelief (par exemple un petit replat naturel ou une situation au pied du versant de la moraine) peut être la cause d'un changement d'approvisionnement en eau et d'un colluvionnement de particules fines, ce qui provoque un enrichissement relatif en éléments nutritifs et l'installation d'une végétation plus luxuriante avec graminées et fougères. Comme la litière de graminées est plus facilement dégradable que celle des éricacées (rhododendron, myrtilles), il n'y a pas d'accumulation de matière organique, le sol y est peu acide, le rapport C/N est nettement plus faible et la diversité végétale relativement élevée.

Sensibilité et utilité des indices écologiques.

Tous les indices que nous avons testés (R, F, H, N, D, L, K, T) se sont montrés suffisamment sensibles pour une application à l'échelle choisie et dans un milieu homogène. Sur la moraine de la Barme, K, H, L et R révèlent les plus grandes amplitudes, c'est-à-dire jusqu'à 1 unité dans l'échelle de 1 à 5. Vetterli (1982) et Egger (1994) ont observé au contraire une forte variation de l'indice F.

Outre l'utilité des indices écologiques pour des comparaisons temporelles sur une ou plusieurs dizaines d'années (Delarze, 1994 et Dähler, 1993), il est possible de les appliquer pour des comparaisons spatiales à différentes échelles. En général, les comparaisons envisageables sur la base des indices écologiques dépendent du type de moyenne qu'on calcule. La moyenne générale donne de bonnes informations sur les caractéristiques de la station en tant qu'unité. Elle sert de référence pour des comparaisons soit avec d'autres stations à l'étage subalpin sur des substrats différents, soit avec des stations appartenant à d'autres étages de végétation. Les moyennes de classe permettent la comparaison avec d'autres stations sur le même substrat à l'étage subalpin. Enfin, les moyennes de carré peuvent être utilisées pour des comparaisons entre des sites d'observation de la même classe de végétation.

Par rapport au milieu étudié, les corrélations significatives peuvent être interprétées de la façon suivante : le pH de l'horizon O peut être bien estimé par R, mais aussi par H; le rapport C/N est bien décrit par N; l'épaisseur de l'horizon O est moins bien prévisible, mais toutefois en relation avec H, L et D; la teneur en matière organique peut approximativement être estimée par R.

La valeur prévisionnelle des indices simplifiés dépend du type de comparaison envisagée. Comme la moyenne générale reste constante pour D, K, N et F, la méthode simplifiée ne pose pas de problèmes lors de comparaisons avec d'autres étages de végétation ou d'autres substrats. Par contre, pour H, R, T et L dont la moyenne générale est modifiée, il faut être prudent, car on va notamment surestimer la teneur en humus et l'acidité du sol. Pour l'étage subalpin et la même roche-mère, la méthode simplifiée se révèle plus efficace que la méthode classique (relevés complets) pour la recherche des sols humides, mal drainés, mal oxygénés et des sols secs, bien drainés et bien oxygénés (le coefficient r de Webster, calculé pour les relevés simplifiés par rapport aux relevés complets, augmente de 0.80 à 0.91 pour D et de 0.87 à 0.93 pour F). La détection de sols très acides et peu acides sur le même substrat paraît également possible par l'indice R simplifié. Il faut toutefois être prudent avec l'interprétation des chiffres, car l'écart-type de la moyenne générale augmente beaucoup. L'indice N perd tout à fait sa sensibilité, c'est-à-dire il y a un nivellement complet entre les différents sites; la détection de différents rapports C/N n'est donc ainsi pas possible.

En conclusion, les indices écologiques de Landolt (1977) se sont révélés suffisamment sensibles pour une application à l'échelle choisie. Ils peuvent être considérés comme un outil très utile pour l'analyse statistique de la végétation, ainsi que pour pressentir certaines caractéristiques des sols, même à très grande échelle. Le pH, ainsi que le rapport C/N sont fortement corrélés au type de végétation; ils sont approximativement

prédictibles par l'indice R et N. Par des relevés floristiques simplifiés dans lesquels on répertorie seulement les espèces abondantes, les comparaisons avec d'autres substrats ou d'autres étages de végétation sont possibles sous réserve de certaines précautions. Moins utilisés par les pédologues que par les botanistes, les indices écologiques pourraient néanmoins fournir des informations utiles avant l'entreprise d'une étude des sols.

Remerciements

Ce travail, effectué dans le cadre du Cycle postgrade en Sciences de l'Environnement, fait partie du projet No. 2000-5-231 du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Messieurs P. Hainard et R. Delarze (Institut de Botanique systématique et de Géobotanique, Université de Lausanne), O. Kölbl (Institut de Photogrammétrie, EPF-Lausanne), A. Bosshard et R. Webster.

BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S. 1995 - *Référentiel pédologique : Principaux sols d'Europe*. INRA, Paris.
- BLESS R., 1984 - *Beiträge spät- und postglazialen Geschichte der Gletscher im nordöstlichen Mont Blanc Gebiet*. Geogr. Inst. der Universität Zürich, vol. 15.
- BONNEAU M. & SOUCHIER B., 1994 - *Pédologie : Constitutions et propriétés du sol*. Masson, Paris.
- BRAUN-BLANQUET, J. 1964 - *Pflanzensoziologie : Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer, Wien.
- BÜTLER R., 1995 - *Photo aérienne infra-rouge et valeurs indicatrices en tant qu'outils pour la pédologie*. Rapport de recherche, 3ème Cycle en Sciences de l'environnement, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département du Génie Rural.
- DÄHLER W., 1993 - *Langfristige Auswirkungen menschlicher Eingriffe in alpine Vegetation*. Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme der Schweiz, Geobot. Komm. der Schweiz. Akademie der Naturwissenschaften, Fascicule 69.
- DELARZE R., 1994 - *Dynamique de la végétation sur les pistes ensemencées de Crans-Montana (Valais, Suisse). Effets de l'altitude*. Botanica Helvetica, Bulletin de la Société botanique suisse, Birkhäuser Verlag, Basel, vol. 104 No. 1, juin 1994, pp 3-16.
- EGGER B., 1994 - *Végétation et stations alpines sur serpentine près de Davos*. Veröffentl. des geobot. Inst. der ETH Zürich, Stiftung Rübel, Zürich, 117. Heft.
- F.A.O., 1977 - *Directives pour la description des sols*. Organisation des Nations, Unions pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome.
- HAINARD P. & JACQUEMOUD F., 1975 - *Originalités de la région valaisanne*. Dans "Etude écologique des massifs des Aiguilles Rouges, du Haut-Giffre et des Aravis (Haute-Savoie)", Annales du Centre Universitaire de Savoie, Sci. nat., tome spécial, pp 101-106.
- LANDOLT E., 1977 - *Oekologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora*. Veröffentl. des geobot. Inst. der ETH Zürich, Stiftung Rübel, Zürich, 64. Heft.
- LEGROS J.P. & CABIDOUCHE Y.M., 1977 - *Les types de sols et leur répartition dans les Alpes et les Pyrénées cristallines*. Documents de cartographie écologique, Grenoble, vol. XIX, 1-19.
- MARRO C., 1987 - *Les granitoïdes du Mont-Blanc en Suisse*. Thèse N° 909, Univ. Fribourg (Suisse), 121 p.
- MUELLER-DOMBOIS D. & ELLENBERG H., 1974 - *Aims and methods of vegetation ecology*. Wiley, New York.
- OYAMA M. & TAKEHARA H., 1987 - *Revised Standard Soil Color Charts*.
- OZENDA P., 1964 - *Biogéographie végétale*. Doin, Paris.
- SCHERRER B., 1984 - *Biostatistique*. Gaëtan Morin éditeur, Chicoutimi, Québec, Canada, 850 p.
- VETTERLI L., 1982 - *Alpine Rasengesellschaften auf Silikatgestein bei Davos mit farbiger Vegetationskarte 1 : 2'500*. Veröffentl. des Geobot. Inst. der ETH, Stiftung Rübel, Zürich. 76. Heft.
- WEBSTER R. & OLIVER M.A., 1990 - *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press, New York.
- WILDI O., 1986 - *Analyse vegetationskundlicher Daten : Theorie und Einsatz statistischer Methoden*. Veröffentl. des geobot. Inst. der ETH Zürich, Stiftung Rübel, Zürich, 90. Heft.