

REPARTITION DES MILIEUX CALCAIRES, CALCIQUES ET ACIDIFIES
EN HAUTE MONTAGNE CALCAIRE HUMIDE

CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES

par Jean-Paul LEGROS⁽¹⁾, Jean-Paul PARTY⁽²⁾ et Jean-Marcel DORIOZ⁽³⁾

Introduction	138
I.- Caractérisation des milieux calcaires, calciques et acidifiés	138
II.- Organisation verticale des sols	142
III.- Organisation spatiale des sols	146
IV.- Conséquences agronomiques et écologiques	148
Conclusion	154
Bibliographie	155

RESUME.- Les études pédologiques réalisées dans les Alpes humides sur roches calcaires montrent la complexité de la répartition des sols calcaires, calciques et acidifiés. On note aussi l'étroite correspondance entre le chimisme du sol et la flore des alpages (calcicole ou acidophile). Tout ceci influe sur la valeur pastorale des pelouses d'altitude, sur la biomasse produite et sur l'étalement de la productivité de l'herbe.

Dans ces conditions, il est utile d'étudier, en montagne calcaire, la répartition des milieux calciques et acidifiés. Pour cela les auteurs montrent qu'il est nécessaire de s'intéresser plus particulièrement aux roches-mères, aux situations géomorphologiques, et aux éléments grossiers présents dans les profils (forme, dimension et altération des cailloux).

Une synthèse des observations est réalisée sous la forme de deux cartes intéressantes des alpages de Haute-Savoie. Il s'agit alors de caractériser les milieux en tenant compte de leur intérêt agronomique: accessibilité, productivité, fragilité (érosion ou colluvionnement).

Enfin, on indique les limites de la méthode en présentant des cas complexes d'associations de plantes calcicoles et calcifuges. La cartographie est alors impossible, même si l'étude du sol permet aisément de comprendre la cause du mélange d'espèces végétales...

Mots-clés.- Sol calcique, calcicole, calcifuge, décarbonatation, acidification, calcaire, montagne, subalpin, alpage, prairie.

(1) INRA, Science du Sol, Place Viala, 34060 Montpellier

(2) "SOL-CONSEIL", 12, rue de l'Arc en Ciel, 67000 Strasbourg

(3) INRA, Science du Sol, Avenue de Corzent, 74203 Thonon-les-Bains

SUMMARY.-

Soil surveys conducted on calcareous rocks in the Alps located in damp climates show the complex distribution of acid, calcic and calcareous soils. They also bring out the close relationship between soil pH and mountain pasture flora (calcicol or calcifuge). All these elements contribute to the quality of high altitude pastures and the amount as well as the seasonal distribution of grass produced.

Under these conditions, it is useful to study the distribution of acid and calcic soils. In order to do this, the authors show that it is necessary to take a closer look at the parent rocks, the geomorphological environment, and the coarse fraction in the soil profiles (the form, the size, and the degree of weathering of pebbles).

A map for each of two pastures of Haute-Savoie, which summarizes the observations made, was drawn up. An attempt was made to describe the environment in terms of its implications on agriculture: accessibility, productivity, and weaknesses (erosion, stability, or colluvial accumulation).

Finally, it was necessary to indicate the limits of this method by presenting some complex cases where a mixture of calcicol and calcifuge plants made the drawing up of a map impossible, even when the soil survey made it easy to understand why the plant species were so mixed.

Key-words.- Calcic soil, calcicol, calcifuge, decarbonatation, acidization, limestone, mountain, subalpine, mountain pasture, grassland.

INTRODUCTION

En montagne calcaire humide, les sols ont une forte tendance à se décarbonater rapidement. Mais différents phénomènes contrarient localement cette évolution. Au total, la couverture pédologique est constituée d'une mosaïque de milieux calcaires, calciques et acidifiés. Il est important de localiser et de caractériser convenablement ceux-ci, compte tenu du rôle joué par le calcium dans le comportement écologique et agronomique des différents types de sols.

En nous appuyant sur l'expérience que la cartographie pédologique systématique nous a amenés à accumuler lors de l'élaboration des coupures à 1/100 000e de Chamonix et de Thonon-les-Bains, nous allons présenter successivement:

- la caractérisation in situ des couvertures pédologiques en milieux calcaires, calciques et acidifiés;
- l'organisation verticale et spatiale des horizons et matériaux riches ou pauvres en calcium;
- les conséquences agronomiques et écologiques de cet état de fait.

En revanche, nous effleurerons à peine les problèmes de typologie et laisserons de côté tout ce qui relève de la pédogenèse. Nous ne parlerons donc pas du rôle de la matière organique en dépit de l'importance de celle-ci en montagne. Cela tient à plusieurs raisons. D'abord le sujet que nous traitons est assez vaste et il est impossible d'y ajouter encore des développements sur l'évolution des différents types de sols. En outre, des travaux importants fournissent tous les renseignements souhaitables sur la différenciation des profils pédologiques en milieu calcaire, avec une bonne indication des relations sol-milieu (DUCHAUFOR et BARTOLI, 1966; BOTTNER, 1971; GAIFFE, 1976; POCHON, 1978; PARTY, 1982; GAIFFE et BRUCKERT, 1985, ...). Enfin et surtout, nous voulons démontrer qu'il est tout à fait possible d'acquérir une connaissance sérieuse et utile sur la couverture pédologique sans être obligé de dominer et de manipuler le vocabulaire des spécialistes. En bref, nous voulons seulement attirer l'attention sur les observations que tout naturaliste ou agronome est susceptible de faire pour replacer ses propres investigations dans un contexte édaphique rapidement mais sérieusement caractérisé.

I - CARACTÉRISATION DES MILIEUX CALCAIRES, CALCIFIQUES ET ACIDIFIÉS**A - GENERALITES**

Il n'est pas inutile de rappeler que l'on distingue en principe trois grands cas en se référant au carbonate de calcium du sol :

1 - Des sols calcaires, c'est-à-dire contenant du carbonate de calcium dans la terre fine. Sous l'action de l'acide chlorhydrique dilué deux fois, les matériaux en cause font effervescence. En fait, le carbonate de calcium est souvent présent à la fois dans la terre fine et dans la charge grossière (graviers, cailloux, blocs). Le calcaire le plus fin, inclus dans la fraction limon ou argile, est le plus réactif en raison d'une grande surface développée par rapport à sa masse. Il correspond à peu près au "calcaire actif" dosé à l'oxalate d'ammonium. Il paraît le plus important du point de vue de l'écologie et de la nutrition végétale. En fait, des sables peuvent être très réactifs s'ils sont fissurés et développent en conséquence une grande surface en dépit de leur dimension (CALLOT et DUPUIS, 1980).

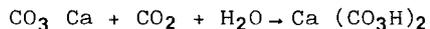
2 - Des sols calciques. Le carbonate de calcium est un sel assez fortement soluble (OLIVE, 1978). Il a donc tendance à disparaître de la terre fine par dissolution. Celle-ci ne fait plus effervescence. Cependant, d'assez grosses quantités de calcium restent présentes dans le milieu, sous forme d'ions solidement retenus par l'argile. On dit alors que le sol est calcique; seule la roche-mère sous-jacente demeure calcaire.

3 - Des sols acides. L'appauvrissement en calcium peut se poursuivre et le milieu devenir acide lorsque l'argile voit la plupart de ses sites d'échanges occupés par des ions H^+ ou Al^{3+} .

Naturellement, l'acidification est un processus progressif et rarement complet. La limite entre les sols calciques et les sols acides est donc, de fait, conventionnelle. Nous tenterons cependant de la préciser plus loin.

B - LA DECARBONATATION DES ROCHES ET L'APPARITION D'UN RESIDU

La dissolution du $CO_3 Ca$ sous l'action de l'eau chargée de gaz carbonique est un phénomène très complexe. Une bonne douzaine de réactions chimiques sont en cause (MUXART et BIROT, 1977; OLIVE, 1978). Ainsi, le modèle suivant ne présente-t-il qu'une vision extraordinairement simplifiée:



Cela suffit cependant pour comprendre que la dissolution du carbonate est facilitée par l'augmentation de la teneur en CO_2 . On admet, en général, la loi suivante, fournie par de nombreux auteurs, avec quelques variations de détail dans la valeur des coefficients (GRAS, 1974):

$$\text{Log} [Ca] = 0,35 \text{ Log } PCO_2 + 2,57 \text{ à } 20^\circ \text{ ou } 25^\circ$$

En réalité, la dissolution dépend de toute une série de facteurs, en particulier :

- La température. Lorsqu'elle baisse, la solubilité du gaz carbonique est augmentée (PLUMMER et BUSENBERG, 1982, par ex.).
- L'activité biologique. Une bonne activité biologique favorise une forte production de CO_2 . Ainsi, dans le sol, la proportion de CO_2 est 10 fois ou 30 fois ou même 100 fois supérieure à celle de l'atmosphère.
- Le régime hydrique. L'augmentation des précipitations accroît l'exportation de calcium dans la mesure où celui-ci est effectivement mis en solution. Ce n'est pas toujours le cas. Ainsi les eaux de fonte des neiges sont parfois sous-saturées en calcium, c'est-à-dire peu exportatrices (LEPILLER, 1979).

Tous ces facteurs interfèrent et agissent parfois dans des sens opposés. En plus, ils interviennent de manière très hétérogène dans l'espace du profil et dans le temps (BOURRIE, 1976; DURAND, 1980). Au total, il est donc difficile de quantifier leur effet. Ainsi on ne sait pas trop quelle est l'influence globale de l'altitude sur la dissolution du $CaCO_3$, dans l'état actuel de nos connaissances. On note seulement que la tendance à la décarbonatation est générale, en plaine comme en montagne. Les rendzines des Charentes seraient des sols décarbonatés en l'absence du brassage de la terre fine avec les éléments grossiers, sous l'action de la charrue (CALLOT, 1972). D'ailleurs sous les forêts, à proximité des parcelles cultivées, les sols ne sont pas calcaires. De même, la décarbonatation du sol est presque systématique en montagne humide. Nous le montrerons plus loin.

L'exportation de $CaCO_3$ a été estimée de différentes façons par de nombreux chercheurs (CORBEL cité par MUXART et BIROT, 1977; POCHON, 1978; DURAND, 1979;

LEPILLER, 1979,...). Nous avons repris les chiffres disponibles pour tenter de calculer le temps qu'il faudrait, dans les conditions observées par les auteurs, pour construire un sol de 30 cm d'épaisseur, à partir du résidu fourni par un calcaire comprenant 80 % de CO_3Ca et 20 % d'argile. Les résultats obtenus varient entre 15 000 ans et 40 000 ans.

En fait, les glaciers se sont retirés à la fin du Würm, il y a seulement 10 ou 12 000 ans. On imagine donc mal une dissolution plus ancienne et des sols plus vieux. Ainsi, tous les calculs de durée de pédogenèse doivent être considérés avec circonspection. En effet les hypothèses sont nombreuses. Elles portent sur la densité de la roche, celle du sol, l'absence de perte de terre fine, le niveau supposé constant, sur des milliers d'années, des exportations actuelles de CO_3Ca . Les résultats obtenus ont seulement un caractère approximatif. Ils indiquent tout au plus que la couverture pédologique actuelle est le produit d'une évolution se poursuivant activement depuis la fin du Würm.

Dans ces conditions les sols épais ont deux origines :

- Sur calcaire dur, ils représentent la concentration locale des résidus. En d'autres termes on trouve des sols profonds parce que, dans leur environnement, des roches nues, constamment nettoyées, affleurent sur de gigantesques étendues. Ceci explique en particulier l'accumulation importante mais localisée de terre fine dans les fissures du karst (PARTY, 1982).

- Sur calcaire marneux, calcschistes et flyschs, les sols sont statistiquement plus profonds car le résidu de décarbonatation est très important. C'est encore plus vrai dans les conditions topographiques favorables à l'accumulation des altérites. Par exemple, dans le Beaufortin sur calcschistes, il est courant d'observer des sols de plus de 2 m d'épaisseur vers 2 000 m d'altitude (van OORT, 1984).

Naturellement, il faut examiner dans quelle mesure les sols ne sont pas alimentés par le haut, en particules d'origine éolienne. L'hypothèse est envisageable étant donné la durée en cause et la faible épaisseur de matériel résiduel globalement accumulé. D'ailleurs, certains auteurs ont reconnu des minéraux allochtones et des grains éolisés (POCHON, 1978; CABIDOCHÉ, 1979; HERBAUTS, 1981,...). Cependant, ces phénomènes ne nous paraissent pas dominants dans la mesure où l'on ne trouve pas, sur le terrain, d'accumulations éoliennes clairement identifiables.

Enfin, même si la décarbonatation est limitée, elle intervient presque partout. Seuls les matériaux récemment mis au contact de l'atmosphère demeurent carbonatés. C'est le cas des griffes d'érosion et celui des alluvions modernes.

C - ETUDE DES ELEMENTS GROSSIERS

La terre fine n'est pas seulement le produit de l'altération de la roche sous-jacente. Elle représente aussi le résidu de la transformation des éléments grossiers. Ceux-ci doivent être examinés avec attention pour comprendre la dynamique générale du système. On doit observer à la fois leur forme, leur dimension, leur altération et leur répartition dans le milieu.

1 - La forme démontre aisément la dissolution: les éléments initialement anguleux, s'émeussent sur leurs bords. Le phénomène est général mais pas systématique. L'action de l'eau peut également transformer un bloc massif en une sorte de lame de pierre à extrémité fine. Cela est observé aussi bien dans les sols que dans les figures de corrosion caractéristiques du karst nu. Au total, la dissolution arrondit souvent et aiguise parfois. Beaucoup de cailloux extériorisent en même temps les deux formes et présentent un côté rond et massif, un autre fin et tranchant. (cf. photos 1 et 4)

2 - La dimension des éléments carbonatés est un élément important du diagnostic pédologique. La dissolution s'attaque surtout aux particules fines, développant un plus grand rapport surface/masse (LEGROS, 1982). Ainsi, en plaine, la plupart des sols calcaires de France ont une teneur en carbonate de calcium plus importante dans les sables que dans les argiles. En toute logique les limons devraient matérialiser un comportement intermédiaire. En réalité, ils sont souvent anormalement riches en CaCO_3 (DUPUIS, 1969; DUPUIS, 1975). C'est dans beaucoup de

cas le résultat de la "calcitisation" de cellules du cortex des racines puis de la libération dans le sol, des particules d'origine biologique ainsi formées. Leur dimension peut varier entre 40 et 125 μm (JAILLARD, 1984).

En montagne, au contraire, le carbonate de calcium a généralement complètement disparu de la terre fine tout en subsistant au niveau des cailloux et des blocs. Il suffit d'ailleurs de considérer l'arrondi des éléments grossiers pour estimer la profondeur minimale sur laquelle la roche a été attaquée par la dissolution et pour comprendre, en conséquence, qu'aucune petite particule de CO_3Ca isolée n'a la moindre chance de subsister au sein de la terre fine. Dans ces conditions, le test d'effervescence à l'acide chlorhydrique, réalisé sur la matrice, est presque inutile. Il a tout au plus valeur de vérification. (cf. photo 2).

3 - L'altération des éléments grossiers est importante à considérer. Lorsque le calcaire contient un fort résidu de décarbonatation, les graviers, les cailloux et les blocs se dissolvent en conservant à leur périphérie une patine révélatrice. A la limite, on peut trouver des éléments grossiers initialement calcaires et complètement décarbonatés, ou bien conservant tout juste un coeur calcaire. Le cortex d'altération est alors généralement constitué par une sorte de grès poreux et léger, essentiellement siliceux (BORNAND, 1978). Ce type d'observation est important; on verra plus loin le rôle essentiel joué par le résidu de décarbonatation lors de la pédogenèse.

4 - La répartition du CO_3Ca au sein des roches-mères. Beaucoup de roches-mères sont carbonatées sans faire partie, à proprement parler, de la famille des calcaires. C'est le cas des calcschistes, des schistes lustrés, etc. D'autres roches sont assez souvent acides, mais contiennent des bancs de calcaires massifs intercalés (flyschs). Même si la proportion de carbonate de calcium est la même au départ, exprimée par exemple en tonnes pour mille tonnes, l'altération de ces différents types de matériaux n'est pas la même. Ceux qui contiennent du CO_3Ca dans la masse se décarbonatent aisément, la disparition progressive du CO_3Ca assurant le maintien de la porosité et de la perméabilité jusqu'à un stade avancé de pédogenèse (BORNAND, 1978). En revanche, les bancs de calcaire épais fournissent des gros blocs relativement protégés de la dissolution par leur faible rapport surface/masse. Ces blocs persistent dans la roche altérée transformée en terre fine et ils assurent, au moins localement, le maintien de l'état calcique du milieu environnant. En définitive, l'acidification est contrariée par une répartition hétérogène du CO_3Ca dans la roche-mère.

D - ETUDE DE LA TERRE FINE

Sur le terrain, il n'y a pas de difficulté pour caractériser un matériel calcaire. En revanche, la distinction entre l'état calcique et l'état acide pose plus de problèmes. Ainsi, il n'y a pas que des débutants pour confondre parfois un sol brun calcique et un sol brun ocreux, le second étant le seul à être fortement acidifié. Ces deux sols peuvent en effet présenter le même développement d'ensemble du profil et aussi la même couleur ocre ou brun-vif. Il existe cependant des critères de différenciation que l'on doit s'efforcer d'observer :

1 - Les horizons calciques, dès qu'ils contiennent un peu d'éléments fins (limon, argile) sont magnifiquement structurés (grenus, grumeleux, polyédriques ou prismatiques). Mais l'acidification, qui correspond à une perte de calcium, entraîne une déstabilisation de l'état floculé des argiles et donc une dégradation de la structure. Les matériaux acidifiés sont en général faiblement structurés. Il n'y a pas d'agrégats bien individualisés. On parle de structure peu nette ou continue, parfois de structure floconneuse à la fois très fine et peu stable (sols podzolisés).

2 - L'acidification s'accompagne souvent d'un changement de couleur. On passe du brun au jaune, au beige clair ou même au blanc. Cela correspond à une réduction des oxydes de fer sous l'effet du tassement et de la saturation par l'eau, jusqu'à la différenciation d'un véritable pseudogley avec des traces de redistribution du fer (taches rouille).

3 - L'acidification n'est possible que si le matériau, soumis à un appauvrissement important en calcium, n'est pas fortement alimenté par ailleurs en cet élément. Aussi, doit-on être très attentif à la présence de cailloux, pierres

ou blocs de carbonate de calcium dans le milieu. Nous l'avons dit plus haut, mais ceci a déjà été souligné antérieurement (MICHALET, 1982). L'expérience prouve en effet qu'une faible proportion d'éléments grossiers calcaires suffit à empêcher l'acidification de la terre fine qui les ennoie. Le sol calcique est donc typiquement un sol avec terre fine décarbonatée et avec réserve calcaire dans les éléments grossiers. Un sol calcique sans réserve calcaire a tôt fait de s'acidifier en montagne humide.

4 - L'état du complexe absorbant peut être estimé à partir d'une simple mesure de pH. Il existe en effet une relation linéaire assez forte entre pH d'une part et proportion de calcium du complexe absorbant d'autre part (fig. 1a). On note que la relation est vérifiée pour des taux de saturation en calcium supérieurs à 100 %, correspondant en fait à une extraction de calcaire actif en plus du calcium échangeable. La figure montre qu'à partir de pH 6,6 le matériau est le plus souvent saturé en calcium.

En fait, ce résultat est discutable. En effet, la mesure de la capacité d'échange a été réalisée à pH 7, ce qui a pour effet d'accroître artificiellement celle-ci, et donc de sous-estimer le taux de saturation. Des mesures, réalisées au pH du sol, montreraient que la saturation en calcium est atteinte plus tôt; vers pH 5,8 environ. C'est donc à ce niveau qu'il convient de fixer la limite (plus ou moins arbitraire) entre sols calciques et sols eutrophes puis acidifiés.

Par ailleurs, même les sols acidifiés (pH de 4 ou 5) conservent encore, dans ces milieux, 50 % de calcium sur leur complexe absorbant (fig. 1b).

II - ORGANISATION VERTICALE DES SOLS

Ainsi que nous l'avons dit en introduction, notre but n'est pas réellement de présenter ici de manière détaillée les types de sols et leurs conditions de mise en place. Notre revue sera donc schématique et non exhaustive. Elle a pour objet de montrer qu'au bout du compte, la pédogenèse est responsable de l'apparition, dans le milieu naturel, d'une extraordinaire superposition verticale de couches calcaires, calciques et acidifiées. Ce sont les horizons des sols. L'impression de complexité sera renforcée, dans le paragraphe suivant, lorsqu'on introduira la dimension latérale, donc spatiale, des phénomènes.

A - LES SOLS CALCAIRES

Ils sont rares, paradoxalement, en dépit de la présence d'un substrat carbonaté. Ceci a déjà été souligné à de nombreuses reprises (DUCHAUFOR et BARTOLI, 1966; BOULAIN, 1972; GENSAC, 1977). Dans les Alpes du Nord, si on excepte les falaises, les karsts nus et les parois rocheuses (roches affleurantes), les sols calcaires représentent beaucoup moins de 1 % de la surface. On les trouve dans les griffes d'érosion et à l'aval de certains couloirs d'avalanches ou cônes de déjection fonctionnels. Les niveaux d'alluvions récentes ou sub-récentes sont également carbonatés (RIEFFEL, 1975).

B - LES SOLS FORTEMENT ET PROFONDEMENT ACIDIFIES

Ils sont inégalement représentés. Il faut distinguer :

- Les sols podzolisés

Ils sont assez abondants sur certains flyschs et calcschistes de Savoie (Avoriaz, Morzine, Beaufort). Il s'agit, suivant les cas, de sols bruns ocreux présentant un horizon légèrement bianchi (hydromorphie ?), parfois même de véritables podzols nains humo-ferrugineux. Ces derniers sont de fait rares, localisés en général sur des sommets de buttes et associés à des rhododendrons. On ne les trouve pas sur calcaires marneux trop riches en argile et peut-être en fer (SOUCHIER, 1971; MICHALET, 1982).

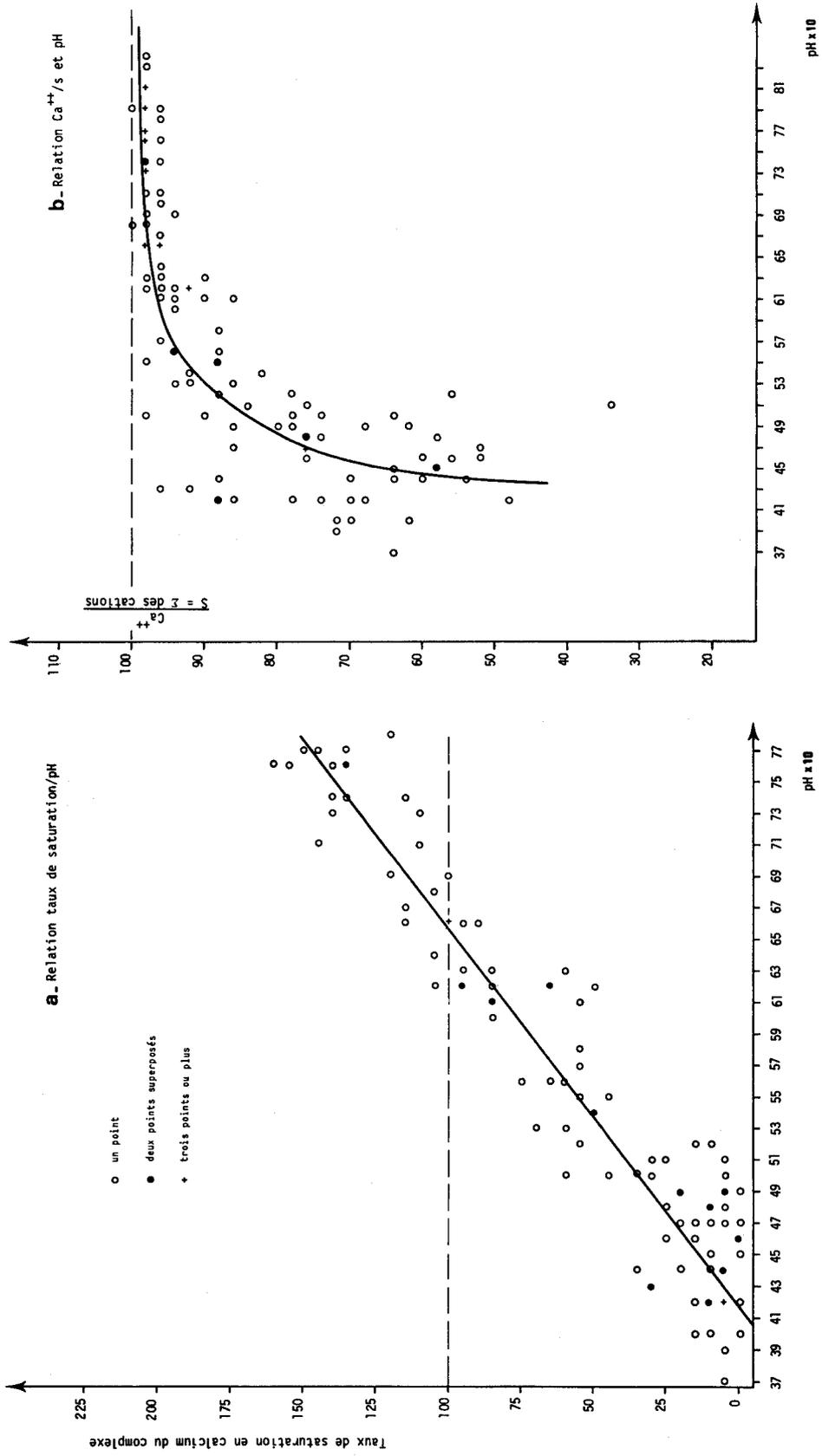


Figure 1
Soils de la région de Flaine et du Chablais

- Les sols lessivés

Ils paraissent absents de la haute montagne calcaire humide. La situation est donc ici assez différente de celle qui prévaut en Lorraine ou dans le Jura ou même dans le Vercors (BOTTNER et PAUJET, 1972; GURY et DUCHAUFOR, 1972; GAIFFE et SCHMITT, 1980; INAPG, 1981). Toutes sortes de causes sont à invoquer. La durée de pédogenèse nécessaire à la mise en place de sols lessivés est longue (DUCHAUFOR, 1977), beaucoup plus longue que celle envisagée plus haut pour la différenciation de sols calciques. Cette durée dépasse peut-être le million d'années, dans certains cas au moins (LEGROS, 1982). Dans ces conditions l'érosion liée à la pente et le rabotage dû aux glaciers ont certainement pu entraver la différenciation de ces sols ou provoquer leur disparition. Mais surtout, les climats de montagne sont peu favorables à l'apparition de véritables sols lessivés. On a montré par exemple, sur les granites du Massif central, que l'aire du lessivage était confinée à la tranche d'altitude la plus basse (LEGROS, 1975). Dans les Alpes humides, le lessivage semble intervenir seulement en dessous de 1 000 m tout en demeurant extrêmement discret (moraines et terrasses de Thonon-les-Bains).

C - LES SOLS CALCIQUES

Ils sont très abondants. Deux catégories principales sont à distinguer :

- Les sols humifères de type litho-calcique et humo-calcique

Ils peuvent se transformer localement en véritables rankers. Ils sont constitués d'une couche sombre, riche en humus, en général calcique ou peu acidifiée, reposant à profondeur variable sur une dalle de calcaire dur ou sur des éboulis à éléments très grossiers et peu altérables. (cf. photo 3)

- Les sols bruns calciques

Ils se présentent sous toutes sortes de formes. Ce sont des sols avec ou sans réserve calcaire au niveau des éléments grossiers, des sols dont la décarbonatation est superficielle ou bien totale sur plusieurs mètres. Dans son état actuel, la classification française des sols ne permet pas de décrire cette variabilité, importante au plan de la pédogenèse et au plan agronomique. Il est donc souhaitable de ne pas s'en tenir à l'identification du taxon "sol brun calcique" et de préciser les caractères du sol par une solide périphrase du type: "sol calcique en A et B, avec une charge calcaire grossière, reposant à 110 cm sur une dalle calcaire".

D - REMARQUE

Quelques points particuliers intéressant la systématique des sols méritent d'être signalés :

- D'abord, on note la présence de pélosols sur certaines marnes ou calcaires très argileux. Ce sont des sols très riches en éléments fins caractérisés par un magnifique horizon B de structure polyédrique grossière, parfois prismatique, avec des faces lissées et luisantes. La confusion avec des sols lessivés est possible surtout lorsque les pélosols s'acidifient fortement et deviennent hydromorphes... Mais, on n'y observe pas de cutanes, contrairement à ce qui se passe en plaine (MATHIEU, 1975).

- En second lieu, il faut mentionner la rareté des re-précipitations de carbonate de calcium à la base des profils. C'est une situation différente de celle prévalant en plaine (DURAND, 1980), dans les Alpes du Sud (LEGROS et al., 1980) et dans les Alpes internes. Dans les Alpes du Nord au contraire, les phénomènes soustractifs demeurent complètement prépondérants. Nous avons cependant trouvé des aiguilles de calcite et divers types de concrétionnement au sein des grandes moraines du glacier du Rhône (Würm I et II, région de Thonon-les-Bains). Il s'agit alors d'un cailloutis très aéré avec des vides très nombreux. La précipitation du CaCO_3 y est probablement liée à des phénomènes d'échange rapide du CO_2 entre la solution du sol et l'atmosphère.

La figure 2 schématise de manière non exhaustive l'organisation des horizons calcaires, calciques et acidifiés à l'intérieur de quelques profils typiques.



1 – Moraine sub-actuelle. Les blocs sont anguleux attaqués et nettoyés par gélifraction, la terre fine et la végétation sont presque absents.



2 – Moraine du Würm récent. Les blocs montrent des traces de dissolution et ils ont tendance à s'arrondir. La terre fine résiduelle est abondante et la couverture herbacée a déjà envahi 50 % de la surface.



3 – Sol humifère acide couvert d'Ericacées sur matériel calcaire (Moraine à gros blocs). Courchevel 1850 m. (Savoie).



4 – Sol calcique présentant encore des éléments grossiers calcaires isolés. Ceux-ci ont une forme arrondie avec cependant quelques arêtes vives.

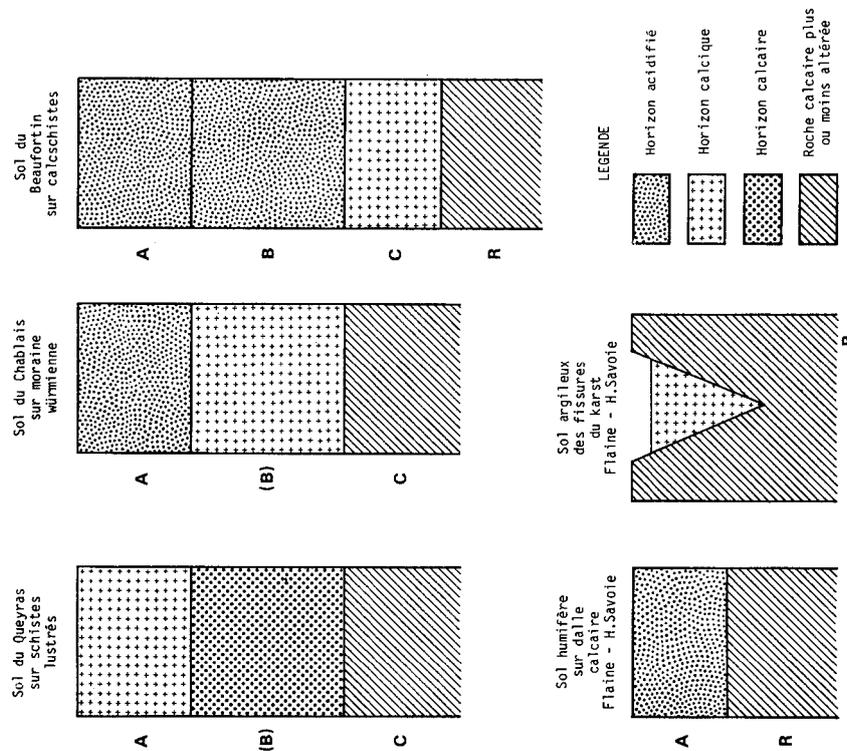
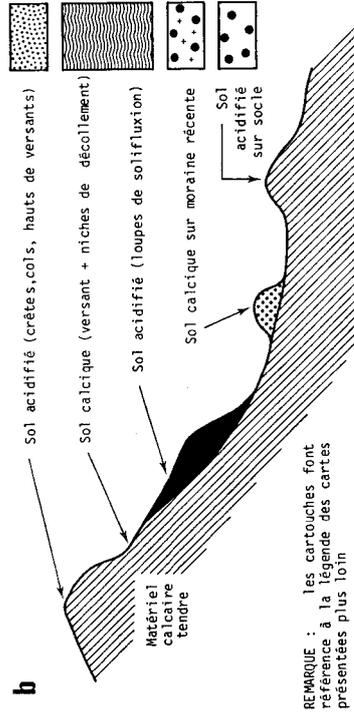
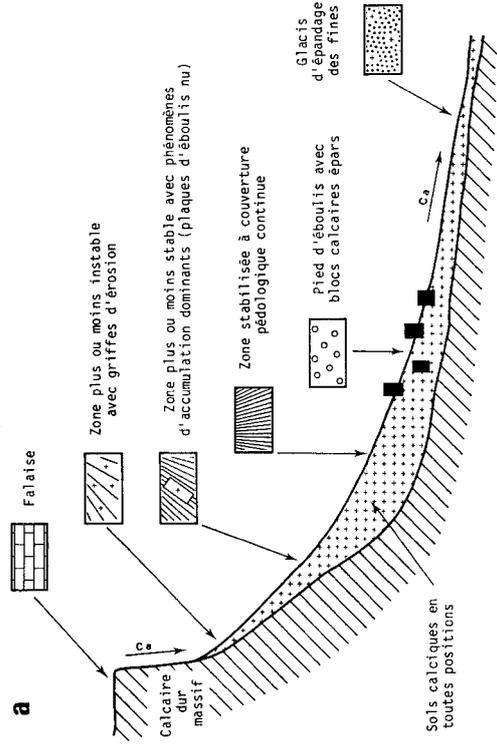


Figure 2

Organisation des horizons calcaires, calcaires et acidifiés dans quelques sols de montagne

Figure 3

Versants calcaires et versants acidifiés en montagne humide

III - ORGANISATION SPATIALE DES SOLS

Les profils dont nous venons de donner un aperçu, se répartissent dans le paysage d'une manière complexe. Climats, végétations, roches-mères, topographies, durées, actions humaines mêlent leurs effets et déterminent au bout du compte une véritable mosaïque de sols. Ces différents facteurs ont cependant des rôles plus ou moins importants.

Ceci nous conduit à passer sous silence l'action du climat. En effet celui-ci est relativement homogène, dans la mesure où nous limitons notre propos au seul cas des hautes-montagnes humides (étage subalpin essentiellement). De toute façon, le rôle du climat reste limité dans les milieux étudiés, relativement tamponnés par la présence de calcium, d'argile et de fer. Ainsi on ne trouve pas sur calcaire les belles séquences altitudinales de sols, caractéristiques du granite (LEGROS, 1975; LEGROS et CABIDOCHÉ, 1977).

Le facteur temps a déjà été évoqué plus haut.

La végétation paraît plus un révélateur du type de pédogenèse et du degré d'acidité du sol qu'une cause première de l'évolution de celui-ci. C'est du moins l'impression qui ressort des observations de terrain et qui recoupe les résultats obtenus antérieurement sur granite (SOUCHIER, 1971). Quoi qu'il en soit, la végétation joue un rôle important comme critère de cartographie. Elle est aussi largement liée à l'exploitation du milieu par l'homme et présente un intérêt agronomique important. Ceci sera examiné plus loin.

Ici nous voulons seulement indiquer quelques règles simples, expliquant les grands traits de la répartition des sols à partir de la connaissance des roches-mères et de la morphologie locale.

A - ROLE DE LA ROCHE-MÈRE

La nature du résidu de décarbonatation joue un rôle important. Il convient de distinguer plusieurs cas :

1 - Lorsque le résidu est absent et que l'on est en présence d'un calcaire pur et dur (BOTNER, 1971), le sol ne contient que de la roche et de la matière organique. En présence d'une dalle calcaire, le profil est constitué par un horizon holorganique de type mor ou mor calcique venant se superposer au substrat carbonaté. Celui-ci se dissout progressivement (lapiaz) sans s'envoyer dans ses produits d'altération. Il n'est pas recouvert complètement de végétation et de sol. C'est le domaine du karst nu ou demi-nu. Lorsqu'il s'agit d'éboulis, la matière organique fait en quelque sorte le liant entre les blocs et les cailloux. Elle est abondante. Sa minéralisation est entravée à la fois par la présence du calcium, et par l'absence d'une liaison avec la matière minérale (CABIDOCHÉ, 1979). Les sols concernés sont typiquement blancs (cailloux) et très noirs (matière organique). Ce sont des sols lithocalciques humifères ou des sols humocalciques.

2 - Lorsque le résidu est très argileux et abondant (calcaire marneux), on obtient des sols dont la morphologie et le comportement sont conditionnés par cette fraction fine dominante (pélosols). En général, le calcium est fortement retenu et le profil demeure celui d'un sol plus ou moins calcique très bien structuré en A (polyédrique) et en B (tendance prismatique). Dans certains cas cependant, l'acidification intervient. La structure se dégrade et l'hydromorphie apparaît.

3 - Lorsque le résidu est sableux, abondant et siliceux (calcaire gréseux), une podzolisation se manifeste parfois. Les sols obtenus sont alors peu épais et avec des horizons très peu contrastés. Leur succession est cependant celle que l'on trouve dans les podzols humo-ferrugineux. Mais la présence de ces sols, sur calcaire, est tout de même une chose exceptionnelle (Flaine, Haute-Savoie). En plus, le résidu quartzeux n'est conservé qu'en position plane. Enfin, l'acidification totale suppose un certain nombre de conditions envisagées plus loin.

4 - Lorsque le résidu est riche en particules de toutes tailles ou lorsqu'il est relativement limoneux (flyschs de diverses sortes), il n'y a pas de voie pré-imposée et plusieurs types d'évolution peuvent intervenir. Les sols sont calciques, peu acidifiés ou fortement acidifiés en relation avec les autres facteurs de la pédogenèse: climat, végétation et topographie en particulier (SERVÉ, 1975; EL ALLAM, 1975).

5 - Le cas des marnes est à considérer à part. Expérimentalement, le

CaCO_3 des marnes est plus facilement mobilisé et solubilisé que le CaCO_3 des roches calcaires massives (SOUMET-DELAIGUE, 1976). Mais sur le terrain, l'imperméabilité de l'argile limite la circulation de l'eau et la décarbonatation. En plus, la faible stabilité du matériau favorise l'ablation de la partie supérieure du sol par une érosion rapide, au moins à l'échelle du quaternaire. Au total, les sols sur marnes peuvent demeurer calcaires. C'est une exception spectaculaire, parmi les sols sur roches carbonatées, dans les Alpes humides. Par exemple : marnes du Dogger ($L_6 - J^3$) dans la région de Lullin près de Thonon-les-Bains ou marnes du Jura (INAPG, 1981).

B - ROLE DE LA MORPHOLOGIE

La topographie joue un rôle essentiel parce qu'elle contrarie ou au contraire facilite l'acidification. Il faut ici distinguer trois cas principaux (fig.3) :

1 - Versants surmontés de falaises ou parois calcaires

Les éboulis qu'on rencontre là sont régulièrement alimentés en carbonate de calcium sous forme de cailloux ou de blocs. En plus, ils sont traversés en profondeur, ou bien lavés en surface par des solutions riches en calcium. Ils ne s'acidifient pas. Ils conservent leur belle structure et leur horizon A homogène grumeleux et riche en matière organique sur parfois 2, 3 ou 4 m d'épaisseur. Cette organisation est typique dans le Chablais de la nappe des Préalpes Médiannes et de la nappe de la Brèche.

2 - Versants sans corniche rocheuse calcaire

L'acidification apparaît plus ou moins poussée suivant la position topographique. Les sites les plus favorables à l'appauvrissement en calcium sont typiquement ceux privés d'un amont carbonaté. Ce sont d'une part les crêtes qui portent presque systématiquement des sols très épais (en relation avec une faible vitesse de circulation des eaux de ruissellement). Ce sont d'autre part les sommets des loupes de solifluxion qui constituent des points hauts par rapport au plan formé par la surface générale du versant.

3 - Fonds de vallons

Ils sont de deux types. Lorsqu'ils constituent la zone basse des éboulis ou le glacis d'épandage des matériaux fins et des solutions carbonatées qui circulent sur les versants, ils portent alors des sols calciques. En revanche, s'ils sont isolés de l'amont calcaire parce qu'ils sont très larges ou présentent des bombements, ils peuvent s'acidifier fortement. Ceci avait été bien vu antérieurement (CABIDOUCHE, 1979). Dans le détail il faut encore distinguer deux cas: les pointements du socle sont systématiquement acides, les moraines en revanche peuvent demeurer calciques, si elles sont très récentes et riches en fragments de calcaire dur (voir cartes ci-après).

C - INTERACTIONS ROCHE-MORPHOLOGIE

Les schémas présentés, bien que reproduisant les cas les plus typiques et les plus répandus, ne peuvent prétendre traduire toute la complexité de l'organisation spatiale des milieux calciques et acidifiés. C'est pourquoi il est utile d'introduire quelques remarques complémentaires.

1 - La roche-mère et la morphologie interfèrent. En effet, la susceptibilité d'une aitérite à la décarbonatation dépend simultanément de la nature du matériau constitutif et de l'environnement dans lequel celui-ci se trouve placé. Ainsi l'état calcique se maintient plus difficilement, même sur des pentes fortes, si le résidu d'altération de la roche est très sableux ou limoneux (brèches du Chablais).

2 - Dans les cas limites au plan de l'acidification, les détails de la morphologie peuvent prendre une très grande importance, même à l'échelle du mètre. Par exemple: décarbonatation sur les micro-bosses et maintien de l'état calcique

dans les micro-cuvettes.

3 - Globalement la morphologie et la roche définissent ensemble une bonne douzaine de types de versants (rôle de l'altérabilité, du pendage, de la déclivité, de l'épaisseur d'altérite, de la continuité de la couverture pédologique, du type d'érosion...). A la limite, chaque flanc de montagne possède sa dynamique propre quant à la circulation du calcium (DORIOZ et al., 1983).

4 - Enfin, beaucoup de nuances dans la répartition des milieux calciques ou acides, peuvent être occultées ou bien exacerbées, au niveau de la végétation par le type d'exploitation pastorale (DORIOZ et PARTY, à paraître).

IV - CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES ET ÉCOLOGIQUES

A - PLANTES CALCICOLES ET PLANTES CALCIFUGES

L'expérience de terrain a conduit les botanistes et phyto-sociologues à distinguer trois types de plantes, ceci dès 1836 (FAVARGER, 1972):

- les plantes calcicoles,
- les plantes calcifuges,
- les plantes dont les préférences sont peu nettes et qui, de ce fait, ont une large répartition.

Il est impossible de fournir ici des listes. Nombre d'espèces pourraient d'ailleurs prêter à discussion. Pour nous, dans tout ce qui suit, nous appelons calcicoles les plantes répertoriées comme baso-neutrophiles dans la notice de la carte écologique des Alpes à 1/100 000e, feuille de Chamonix-Thonon (RICHARD, 1978). On trouvera à la fin de l'exposé quelques exemples de plantes calcicoles et calcifuges, replacées dans leurs milieux respectifs.

Au laboratoire, on a tenté de comprendre les raisons physiologiques de ce comportement différent vis-à-vis du calcium. Les calcifuges, incapables de limiter la pénétration du Ca en milieu calcaire, sont de ce fait littéralement empoisonnées (GHORBAL, 1979; SALSAC, 1980). Plus précisément, le calcium envahit le cytoplasme et désorganise l'activité enzymatique. A l'inverse, les calcicoles placées dans un milieu pauvre en bases, se révèlent incapables de retenir des quantités convenables de cations.

A cette action directe du calcium se superposent différents effets liés aux sols calcaires ou sols acides. Il faut évoquer le rôle du pH, les risques de toxicité aluminique, la disponibilité du fer et celle des différentes formes d'azote (ERNST, 1978). L'azote ammoniacal semble dominer en milieu acide tandis que l'azote nitrique est prépondérant en milieu calcique ou calcaire. Or, de nombreuses acidophiles utilisent peu ou mal les nitrates et sont donc moins bien adaptées à la vie en sol de pH élevé (certaines myrtilles, canche flexueuse...).

Placée dans un milieu qui lui convient mal, une plante donnée voit sa physiologie perturbée et sa croissance ralentie. Son devenir est alors fonction de la compétition exercée par les autres espèces. Or, l'homme et ses troupeaux interviennent sur la dynamique des plantes (azote, prélèvements différentiels intervenant dans le temps et dans l'espace). Aussi la répartition des espèces calcicoles et acidophiles n'est-elle pas strictement indépendante des pratiques pastorales. En fait, tout le problème de l'exploitant consiste, à ce niveau, à faire évoluer la flore et en même temps le sol, dans un sens favorable.

B - CALCICOLES, CALCIFUGES ET QUALITE DES ALPAGES

La qualité d'un alpage, ou plus précisément sa "valeur d'usage" est examinée au niveau de la parcelle de différents points de vue :

- biomasse produite,
- valeur pastorale, c'est-à-dire composition et qualité fourragère de la végétation (JUGLET et JACQUIER, 1976),
- évolution annuelle de la productivité (précocité, repousse).

Il faut aussi prendre en compte, dans une perspective globale de gestion du milieu, la sensibilité aux pratiques mal adaptées et les "marges de progrès". Or,

sur tous les points cités, les milieux acides apparaissent fort différents des milieux saturés à l'étage subalpin humide pâturable.

Le tableau I résume à ce sujet les résultats acquis pour l'alpage de Bise (DORIOZ, 1978), l'alpage d'Ubine (GENRE-GRANDPIERRE, en cours) et dans le Beaufortin (DAMBRINE, 1981; REYDET, 1983), sans oublier les nombreux travaux sur la végétation conduits en différentes régions par l'INERM (BORNARD et DUBOST, 1983).

TABLEAU I
Comparaison des alpages en milieu acide et en milieu saturé

	milieu acide	milieu saturé
Biomasse produite (1500-2000 m)	Faible (20 qx/ha/an) en l'absence de fertilisation	Forte, sauf sol trop caillouteux (jusqu'à 40-50 qx/ha/an)
Valeurs pastorales	Faible	Systématiquement plus forte même en zone caillouteuse (abondance de légumineuses)
Evolution annuelle	Repousse faible, puis senescence rapide (jaunissement)	En général meilleur étalement de la productivité dans la saison
Sensibilité à la dégradation	- Transformation rapide en landes en cas de sous-pâturage - En absence de restitutions suffisantes : développement d'une Nardaie	- En cas de sous-pâturage ou de sur-pâturage pas d'invasion par des espèces défavorables au plan agronomique - Evolution particulièrement lente en général vers le taillis en cas d'abandon
Marge de progrès	En théorie forte mais surtout très coûteuse (débroussaillage, fertilisation, changement de la conduite des troupeaux)	Potentiel agroclimatique relativement facile à obtenir (par une gestion rationnelle des différents secteurs du pâturage)

Même si la comparaison proposée reste schématique et mériterait d'être affinée, il est évident que les milieux calcicoles sont préférables aux milieux acidophiles, de beaucoup de points de vue. Le bétail ne s'y trompe pas, s'il a le choix. Il broute jusqu'à la dernière feuille les herbages des éboulis en dépit d'une accessibilité difficile liée à la pente forte, à la présence de blocs nombreux et de ravines d'érosion. Mais, ce sont justement ces ravines, ces blocs et cette pente qui sont sources de calcium ou causes de son mélange avec la terre fine...

Tout cela indique clairement l'intérêt agronomique de la tentative que nous faisons pour comprendre l'organisation des espaces calciques et acides dans le milieu naturel. Il est temps maintenant de fournir des exemples concrets de cartographie.

C - CARTOGRAPHIE DES MILIEUX ACIDES, CALCIQUES ET CALCAIRES DANS LES ALPAGES DE BISE ET DU PRAZ-DE-LYS (Haute-Savoie)

Compte tenu de ce qui a été dit plus haut, les caractères pris en compte pour cartographier le milieu sont les suivants (fig.4 et 5):

- état de la couverture pédologique (épaisseur, continuité, acidité),
- pierrosité, présence d'affleurements calcaires, type de substrat,
- fonctionnement hydrique (degré d'humidité, présence ou absence d'un amont calcaire),
- déclivité,
- type de pelouse en relation avec l'état calcique ou acide du sol.

Les figurés ont été choisis de telle manière qu'ils suggèrent le sens de la pente lorsque celle-ci est forte. Les croix ont été réservées aux sols calciques et végétations calcicoles. La légende est commune pour les deux cartes.

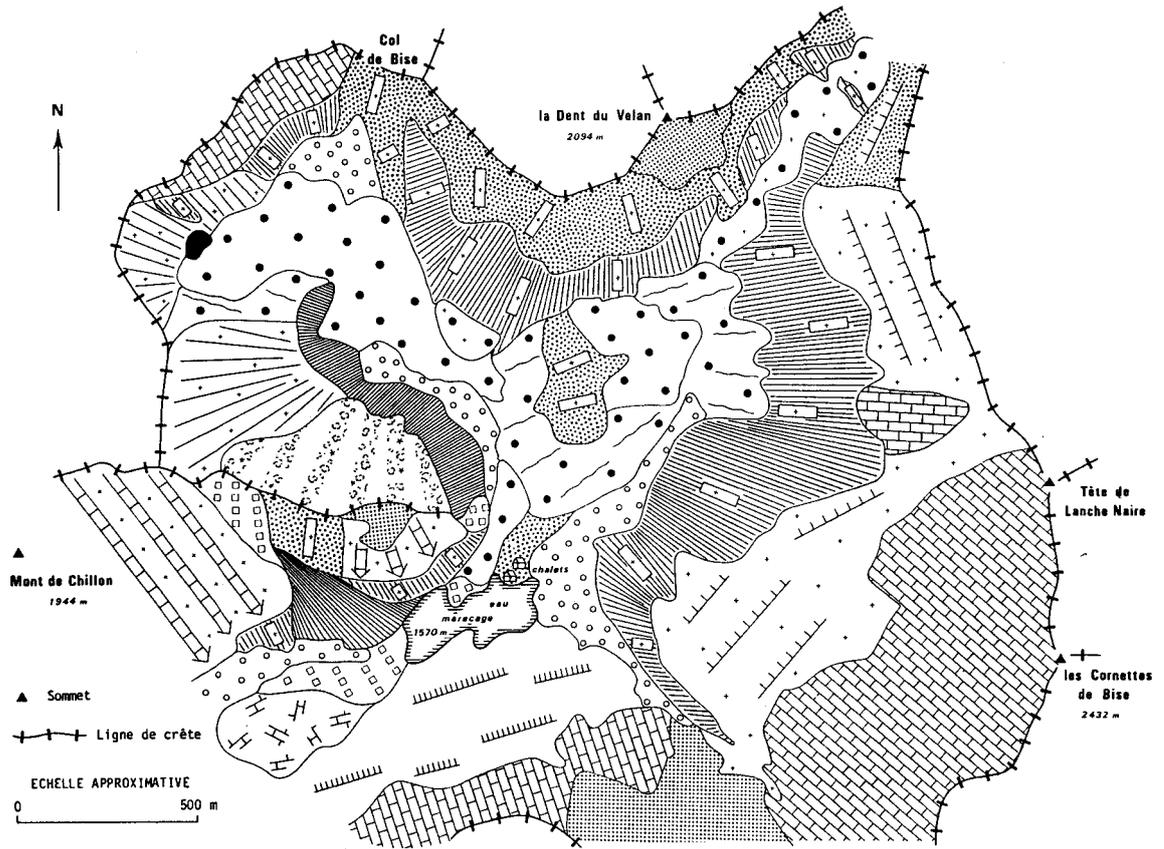


Fig.4- Alpage de Bise
(Vallée d'Abondance - Haute Savoie)

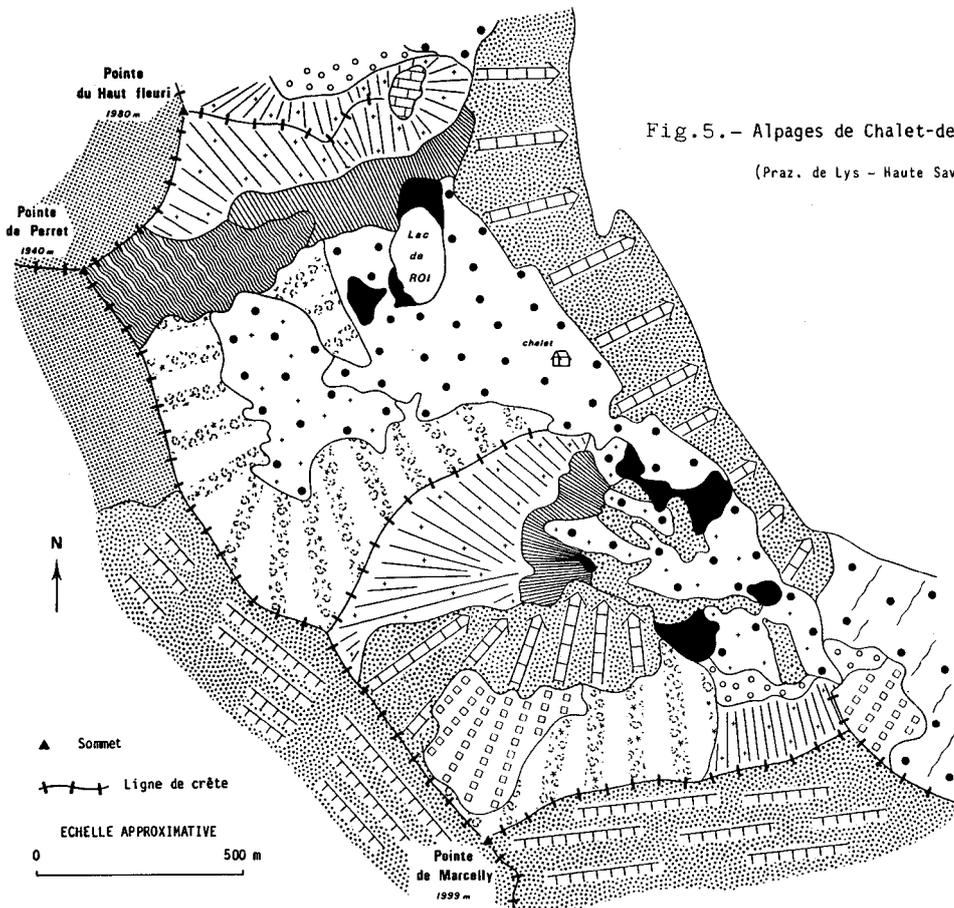
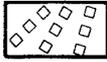


Fig.5.- Alpages de Chalet-de-Roi
(Praz. de Lys - Haute Savoie)

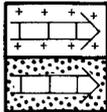
LEGENDE DES CARTES



Roches nues et falaises. Couverture pédologique absente sur plus de 90 % de la surface, pentes très fortes. Milieu calcaire inexploitable.

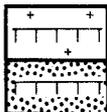


Dérochements et rochers nus. Pentes fortes, blocs énormes, couverture pédologique réduite à quelques coussinets localisés formés d'humus brut (rhododendrons). Non pâturable.



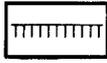
Versants à roches dures plongeantes. Couverture pédologique plus ou moins continue, superficielle, souvent organique.

- calcicole sur calcaire pur et dur (Malm)
- acidophile sur roche riche en résidus quartzeux (brèches régionales).

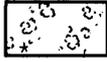


Roches sub-affleurantes (à pendage inverse en général). Hauts de versants. Couverture pédologique presque continue, d'épaisseur faible, en pente forte, peu exploitable, localement coupée par l'affleurement d'un banc rocheux.

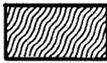
- frais et calcique si amont calcaire
- acide en l'absence d'amont calcaire.



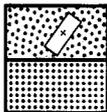
Versants sur roches dures à barres rocheuses successives, entrecoupées d'éboulis en pente très fortes. Blocs, roches, lapiaz. Couverture pédologique discontinue. Intérêt pastoral réduit. Ambiance acidophile.



Versants humides à aulne vert. Couverture pédologique continue. Pentes fortes, éléments grossiers peu abondants, décarbonatés, végétation sub-acidophile. Ubac. Exploitation très réduite.



Versants de solifluxion à couverture limoneuse épaisse. Peu ou pas de rigoles d'érosion. Plaques d'arrachement du sol sur le haut du versant. Bosses d'accumulation dans la partie basse. Limon jaune. Ambiance acidophile en haut de versant et sur les buttes, ambiance fraîche et calcicole dans les creux.

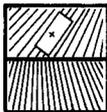


Hauts de versants limoneux à couverture pédologique épaisse. Pelouse à carex ferrugineux ou à canche flexueuse.

- couverture remaniée localement par érosion linéaire. Sub-acide mais calcicole par places. Exploitation très difficile
- couverture pédologique continue, régulière, exploitable, végétation plus ou moins acidophile selon la roche. Evolution possible vers la lande à rhododendrons ou à genévriers nains.

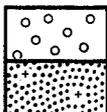


Hauts de versants striés. Couverture pédologique discontinue, épaisse, très caillouteuse, profondément entaillée par des rigoles d'érosion très abondantes (à ne pas confondre avec les éboulis où dominent les phénomènes d'apport). Pentes fortes. Accessibilité difficile. Pelouse méso-hygrophile calcicole à carex ferrugineux.



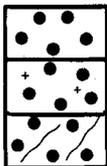
Milieus de versants à éboulis. Bonne alimentation en eau, en particules fines et en calcium. Haute productivité herbagère.

- partie amont avec larges plaques de matériaux non couverts. Sols épais, discontinus, très caillouteux, parfois enfouis sous un mulch d'éléments grossiers. Accessibilité assez difficile. Pelouse à trisète et géranium sylvatique
- partie aval, couverture pédologique continue, épaisse, accessibilité plus ou moins facile. Pelouse à trisète, riche en dactyle.



Bas de versants frais et calcicoles. Couverture pédologique continue, épaisse, calcique, végétation calcicole ou neutrophile. Accès facile. Pente faible. Ambiance fraîche. Actuellement secteurs les plus pâturés (et le plus régulièrement) par le bétail. Pelouse rase à *Poa alpina* et légumineuses à forte valeur pastorale.

- à gros blocs isolés (base d'éboulis)
- cônes de déjections et zones d'épandage à éléments fins.



Fonds de vallons bombés (isolés de l'amont calcaire). Couverture pédologique continue, épaisse (limon jaunâtre), non caillouteuse. Sensibilité au piétinement et au passage répété du bétail. Nardaie typique à faible valeur pastorale. Actuellement peu pâturé. Invasion par les éricacées.

- sans blocs ni affleurements, couverture acidifiée, sol clair, mal structuré
- avec blocs et affleurements calcaires (éboulis, moraines, pointements du socle). Couverture localement calcique.
- transition avec versants de solifluxion, en pentes faibles ou moyennes.



Bas marais calcicoles. Humide toute l'année. Limon très organique. Fibres semi-décomposées. Couleur brune.

- saturé d'eau, non pâturé
- plus ou moins bien drainé. Renoncules à feuille d'aconit. Pâturé.



Karst nu. Pas d'intérêt pratique mais spectaculaire dans le paysage de la montagne.

Il s'agit d'une première tentative qui ne prétend ni à l'exhaustivité ni à une forme définitive. Elle montre que les unités calcicoles exploitables représentent nettement moins de la moitié de la surface de l'alpage. Les meilleurs pâturages sont constitués par la partie moyenne et basse des éboulis. Les sols sont alors très caillouteux et les pentes pas toujours très accessibles. Les sols limoneux épais sont souvent faciles à pâturer. Mais ils correspondent à des milieux presque partout acidifiés et portent une flore peu intéressante. En plus, ils sont fragiles, facilement abîmés par le piétinement du bétail et aisément gagnés par les Ericacées, en cas de sous-exploitation.

Aussi paradoxal que cela puisse paraître en montagne calcaire, on doit envisager le chaulage. Nous avons décidé de procéder à quelques essais localisés, en collaboration avec la profession.

D - ASSOCIATIONS DE CALCICOLES ET DE CALCIFUGES

Les cartes que nous venons de présenter intéressent de grands ensembles de plantes et de sols. Elles négligent les surfaces, d'ailleurs peu étendues, où les espèces calcicoles et acidophiles sont étroitement mêlées, ceci d'une manière pouvant être expliquée par la structure de détail du manteau édaphique. Il est bon d'évoquer ces cas particuliers, dans la mesure où ils paraissent déroutants en l'absence d'observation précise du sol.

Deux schémas d'organisation sont couramment observés: superposition ou juxtaposition de milieux acides et calciques (ou calcaires) (fig.6).

1 - Superposition des milieux acides et calcaires

Nous allons illustrer ce cas par trois exemples concrets.

a) Sol évolué

Profil comprenant des horizons A et B lavés de tout carbonate de calcium alors que la roche-mère est fortement calcaire. C'est le cas des sols bruns lessivés faiblement fersiallitiques des terrasses de Thonon-les-Bains (Haute-Savoie). Dans les bois de cette région, on observe un groupement végétal particulier (DORIOZ, 1978): chênaie à charme, faciès à buis avec présence conjointe d'un cortège réputé plutôt calcicole (buis, viorne lantane, troène, cornouiller sanguin, coronille emerus) et d'espèces acidophiles (châtaignier, houx, myrtille).

b) Humus sur dalle calcaire

Un profil de sol peu évolué, limité en fait à un horizon d'humus pur, est posé sur un rocher calcaire. On trouve là des Ericacées acidophiles (rhododendrons ferrugineux, myrtilles,...). Le phénomène est fort commun et a été maintes fois signalé (GILOT, 1967; RICHARD, 1971, ...). Paradoxalement, les accumulations de terre fine décarbonatée, situées entre les blocs, sont souvent moins prisées des mêmes plantes acidophiles. Celles-ci sont parfois remplacées par des calcicoles, exceptionnellement par le rhododendron hirsute (DORIOZ, 1978). Plusieurs raisons sont probablement en cause :

- sur les roches, les plantes reçoivent seulement les eaux météoriques à l'exclusion de toute solution contenant du calcium;

- il a été démontré (CABIDOUCHE, 1979) que le "degré de fragmentation" du substrat était un facteur important à considérer. Une dalle massive réduit à un plan, c'est-à-dire à la valeur minimale, la surface du contact entre le sol organique et le substratum calcaire. Une plante calcifuge est mieux protégée du calcium dans ces conditions qu'au sein d'une terre fine carbonatée ou même calcique. Notons toutefois que cette localisation particulière des acidophiles sur les dalles calcaires n'est pas observée dans tous les massifs. Il faut en effet beaucoup d'humidité pour assurer le maintien de cette sorte de culture sans sol. Aussi, en milieu relativement sec, les rochers sont-ils nets de toute végétation.

c) Résidu quartzeux sur dalle de calcaire gréseux.

Ce cas, observé à Flaine (PARTY, 1982), est caractérisé par l'association des quatre espèces de saules nains: S. retusa et S. reticulata, plutôt calcicoles, S. retusa ssp. serpyllifolia et S. herbacea, plutôt calcifuges.

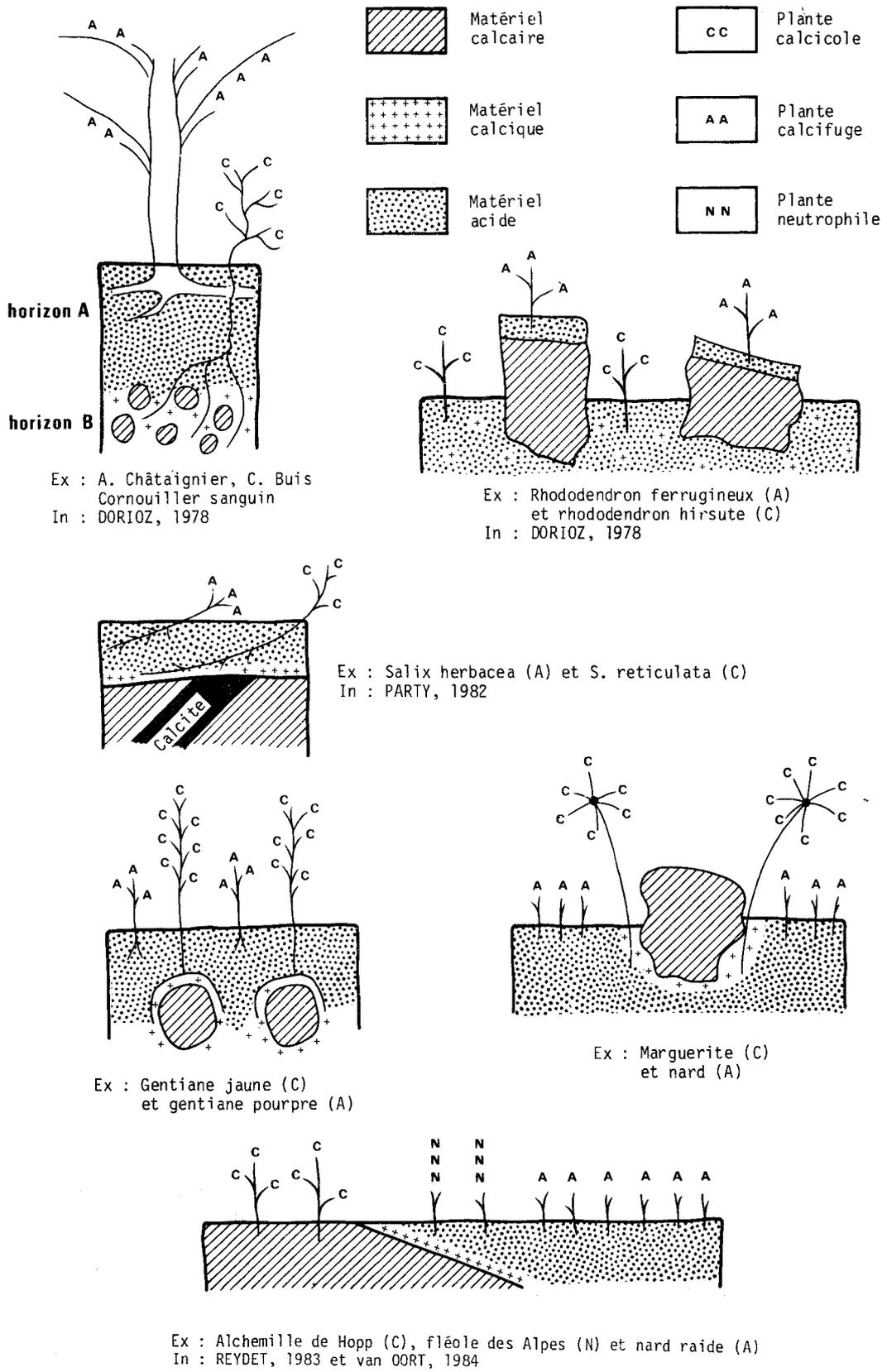


Figure 6.- Associations de plantes calcicoles et calcifuges

2 - Juxtaposition de milieux acides et calcaires

A l'intérieur même d'une unité de sol acidifiée ou en voie d'acidification, les éléments grossiers calcaires déterminent à leur périphérie une sorte d'auréole calcique exploitée par la végétation. Nous allons fournir quelques exemples communs et caractéristiques montrant l'importance de la répartition granulométrique du calcaire (PEDRO, 1972).

a) Au-dessus de la station de Flaine (Haute-Savoie), on peut observer des moraines assez anciennes, plus ou moins acidifiées, mais contenant par place de gros blocs calcaires ayant résisté à la dissolution en raison de leur forte taille. Loin des blocs, la gentiane pourpre est commune (acidophile). Près des blocs, la gentiane jaune est abondante. Celle-ci n'est pas réellement calcicole car elle prospère parfois en milieu acide. Cependant, elle semble préférer le calcium chaque fois qu'elle a le choix. La préférence est peut-être indirecte et liée à l'amélioration des propriétés physiques du sol. En effet, l'observation d'une coupe dans ces milieux est instructive. L'influence de l'ambiance calcique se fait fortement sentir sur 5 à 10 cm tout autour des blocs calcaires qui subsistent. Dans cette frange, le sol a une couleur plus brune et il est mieux structuré. Son pH vaut entre 5,9 et 6,9 c'est-à-dire que le complexe absorbant est complètement saturé en Ca. Au contraire, à plus grande distance de la source de calcium, à partir de 20 cm, le pH retombe à des valeurs comprises entre 5,3 et 5,6 et le sol est nettement plus massif.

b) Dans les pelouses pâturées à nard et canche flexueuse du Praz-de-Lys (Haute-Savoie), les blocs calcaires sont cernés d'une couronne à trèfle rouge et rampant, marguerite, thym et lotier.

c) Dans le Beaufortin, sur le plateau des Saisies, la couverture acidifiée, liée à l'altération des calcshales, est percée çà et là de pointements et affleurements calcaires (REYDET, 1983; van OORT, 1984). La composition floristique est alors organisée en fonction du degré d'acidité, lui-même lié à la profondeur du sol surmontant le calcaire. En s'éloignant de l'affleurement, on observe ainsi sur quelques centimètres la successions suivante:

- Pelouse xéro-calcicole à seslerie (*Seslerietum variae*) avec alchemille de Hoppe sur sol superficiel (< 10 cm) à moder calcique (pH = 6,1) et structure grumeleuse fine.

- Pelouse mésophile à subacidophile à trisète (*Iriseto-Polygonion*) avec phléole des Alpes et alchémille vulgaire, sur sol peu profond (30-40 cm) à mull acide (pH = 5,5) et structure polyédrique subanguleuse.

- Pelouse xéro-acidophile à nard typique (*Nardetum typicum*) avec canche flexueuse à sol profond (50 à 70 cm) à mull-moder acide (pH = 4,8) et structure continue. Mais cette pelouse xéro-acidophile est susceptible de se transformer sous l'influence d'un pâturage intensifié (méthode du pachonnage). La nardaie évolue alors vers une pelouse à trisète avec dactyle. Le sol voit sa structure améliorée. Ceci illustre l'idée, exprimée plus haut, d'une répartition des espèces calcicoles et acidophiles liée non seulement au calcaire mais aussi aux pratiques culturales.

CONCLUSION

En montagne calcaire humide, les sols représentent surtout le résidu de décarbonatation des roches. Ils sont donc acides ou calciques et dépourvus en général de CO_3Ca dans la terre fine. L'acidification est spécialement forte dans les milieux privés d'un amont calcaire: fonds de vallons, loupes de solifluxion bombées, crêtes, sommets de moraines... Dans ces secteurs, les seules sources de calcium sont constituées par les éléments grossiers (cailloux, pierres, blocs, affleurements). Il est donc nécessaire de prêter attention à ceux-ci, d'autant plus que l'état calcique est favorable au maintien d'une végétation productive et appétente pour le bétail.

Il est possible d'étudier la structure de ces milieux et leur intérêt agronomique au moyen d'une cartographie qui s'intéresse essentiellement au degré global d'acidification, à la profondeur du sol, à la continuité de la couverture pédologique, à la pierrosité et à la pente.

Cette méthode offre différentes applications. Elle permet d'abord de délimiter les secteurs à risques dans lesquels des pratiques agricoles inadaptées sont susceptibles d'amener une dégradation rapide de la flore de l'alpage. Elle sert aussi à identifier les zones dans lesquelles la productivité pourrait être facilement accrue, voire optimisée. Elle offre à l'alpagiste et au conseiller agricole un document cartographique où leur connaissance empirique et détaillée du milieu se retrouve, sous une forme organisée, accessible et parfois approfondie.

L'effort que nous avons entrepris doit être cependant poursuivi. En effet, il faut d'abord préciser la façon dont les plantes exploitent les réserves en bases du milieu, en examinant l'organisation de détail de leur système racinaire dans des sols acidifiés présentant des éléments calcaires isolés. Il est ensuite utile de quantifier les relations entre productivité, végétation et caractères du milieu (pH, teneur en calcium, phosphore, etc.). Enfin, il est nécessaire de mieux comprendre l'impact sur la végétation des paramètres bioclimatiques (pluviométrie, énergie solaire) car leur rôle paraît essentiel en montagne. Des travaux sont en cours sur ces différentes questions (GENRE-GRANDPIERRE, à paraître).

Au-delà cependant, on ne doit pas perdre de vue que la qualité d'un alpage n'est pas liée seulement à la richesse de ses différents "quartiers d'exploitation". Elle dépend aussi de la diversité de ceux-ci pour assurer l'étalement de la production d'herbe dans la saison. En d'autres termes, l'étude cartographique proposée ne prendra tout son intérêt que reprise par des spécialistes capables d'intégrer les contraintes du milieu naturel dans le schéma général de fonctionnement du système de production pastorale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les organismes impliqués dans le Programme "Alpes du Nord" (GIS SUACI - INRA - CEMAGREF, Rhône-Alpes) dont l'appui financier et scientifique a permis la réalisation des travaux servant de base au présent article. Ils remercient aussi Bernard SOUCHIER qui a bien voulu relire leur manuscrit et les faire bénéficier de ses conseils.

BIBLIOGRAPHIE

- BORNAND (M.), 1978.- Altération des minéraux fluvioglaciers, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 329 p. + annexes.
- BORNARD (A.), DUBOST (M.), 1983.- La végétation de l'alpage du Mont-Clocher. Document de travail INERM-CEMAGREF, Grenoble, 20 p.
- BOTTNER (P.), 1971.- La pédogenèse sur roches-mères calcaires dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine du sud de la France. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 271 p.
- BOTTNER (P.), PAUQUET (H.), 1972.- La pédogenèse sur roches mères calcaires tendres dans les étages bioclimatiques montagnard, subalpin et alpin des Préalpes françaises du sud. Science du Sol, 1: 63-78.
- BOULAIN (J.), 1972.- Au sujet de quelques sols formés sur roches calcaires en climat perhumide frais (Jura méridional). Science du Sol, 1: 79-84.
- BOURRIE (G.), 1976.- Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. Science du Sol, 3: 141-159.
- CABIDOUCHE (YM.), 1979.- Contribution à l'étude des sols de haute-montagne. Thèse de spécialité, Uni. Montpellier, 152 p.
- CALLOT (G.), 1972.- Les "Terres de Groies" sur calcaires jurassiques en Charentes. Principaux facteurs de différenciation des sols. Science du Sol, 1: 45-61.
- CALLOT (G.), DUPUIS (M.), 1980.- Le calcaire actif des sols et sa signification. Science du Sol, 1: 17-26.
- DAMBRINE (E.), 1981.- Répartition des phénomènes pédologiques sur le plateau des Saisies. DEA, INAPG, 90 p.
- DELMAS (M.), 1981.- Contribution à l'étude de la pédogenèse sur calcaire urgonien à l'étage subalpin (Préalpes du Nord). DAA - INAPG, 66 p.
- DORIOZ (JM.), 1978.- Ecologie du Chablais Septentrional. Contribution à l'étude de la productivité des pâturages chablaisiens. Thèse de spécialité, Univ. Grenoble, 187 p.
- DORIOZ (JM.), van OORT (F.), DAMBRINE (E.), 1983.- Principaux facteurs de répartition des sols sur calcshales dans les alpages du Beaufortin. C.R. 108e Congrès Soc. Savantes, sect. Sciences, I: 115-126.
- DORIOZ (JM.), PARTY (JP.), (à paraître 1987).- Dynamique écologique et typologie de territoires pastoraux alpins. Analyse de l'organisation agroécologique d'un secteur de référence. Oecol. Applic. (3).

- DUCHAUFOR (Ph.), BARTOLI (C.), 1966.- Note sur l'évolution des sols calcimorphes de l'étage Montagnard humide. *Science du Sol*, (2): 29-40.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1977.- Pédologie. Pédogénèse et classification. Masson, 477 p.
- DUPUIS (M.), 1969.- Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques. *Ann. Agro.*, 20: 61-68.
- DUPUIS (M.), 1975.- La répartition granulométrique des carbonates dans les sols. *Science du Sol*, 4: 249-270.
- DURAND (R.), 1979.- La pédogénèse en pays calcaire dans le Nord-Est de la France. Mémoire. *Sciences Géologiques n°55*. CNRS, 198 p.
- DURAND (R.), 1980.- (1). L'évolution d'une rendzine encroûtée sur la craie de Champagne. *Science du Sol*, 3: 201-216.
- DURAND (R.), 1980.- (2). Variations saisonnières de la concentration des solutions et des gaz du sol en milieu crayeux. *Science du Sol*, 3: 217-229.
- EL ALLAM (M.), 1975.- Une séquence de sols sur flysch dans le Chablais (Haute-Savoie). Evolution du fer, de l'aluminium et des argiles. DEA. INAPG-ORSTOM. Paris VI, 34 p.
- ERNST (), 1978.- Chemical soil factors determining plant growth. *Verhndl. koninkl. Nederlands Acad. van Wetenschappen. ASD Natur.*, tweed reekes, 70: 155-187.
- FAVARGER (Cl.), 1972.- La flore. In: Guide du Naturaliste dans les Alpes. Delachaux et Niestlé. p. 113-184.
- FLEURY (Ph.), DORIOZ (JM.), JEANNIN (B.), 1985.- Influence du milieu physique et des pratiques agricoles sur la végétation des prairies de fauche des hautes vallées des Alpes du Nord. Doc. INRA-SAD Versailles, 52 p.
- GAIFFE (M.), 1976.- Aperçu sur la pédologie du Jura central et des régions limitrophes. Clé de détermination des principaux types de sols. *Ann. Sci. Univ. Besançon*. 3e sér., fasc. 17: 53-65.
- GAIFFE (M.), SCHMITT (A.), 1980.- Sol et végétation à l'étage montagnard dans les forêts du Jura central (Haute Vallée du Doubs, de Mouthe à Pontarlier). *Science du Sol*, 4: 265-296.
- GAIFFE (M.), BRUCKERT (S.), 1985.- Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes des sols du Karst Jurassien. *Soils and Geomorphology-Catena*, supp. n°6: 159-174.
- GENSAC (P.), 1977.- Sols et groupements végétaux de la zone des schistes lustrés dans l'étage alpin. Combe de l'Iseran-Val Prariond. *Trav. Scient. Parc National de la Vanoise*, VII: 29-40.
- GHORBAL (M.H.), 1979.- Absorption du calcium, localisation et rôle dans la perméabilité membranaire. Relation avec le caractère calcicole ou calcifuge. Thèse d'Etat, Univ. Montpellier, 402 p.
- GILOT (JC.), 1967.- Note écologique sur divers groupements à Rhododendron ferrugineum L. se développant sur substrat calcaire: exemple des Préalpes occidentales françaises. *Oecol. Plant.* (2): 139-162.
- GRAS (F.), 1974.- Application d'une méthode expérimentale à la détermination du pH et de la solubilité du carbonate de calcium dans les sols calcaires. *Science du Sol*, 1: 33-48.
- GURY (M.), DUCHAUFOR (Ph.), 1972.- Relations entre les formations superficielles et la pédogénèse sur substratum calcaire. *Science du Sol*, 1: 19-24.
- HERBAUTS (J.), 1981.- Evolution des sols sur les sables d'altération des calcaires gréseux du Lias inférieur dans le Sud-Est de la Belgique. *Science du Sol*, 1: 187-218.
- INAPG, (1981).- Tournées des 15 et 16 octobre 1981.- Feuille de St-Claude. Echelle 1/100 000. Doc. SESCOF et Départ. des sols de l'INRA.
- JAILLARD (B.), 1984.- Mise en évidence de la néogénèse de sables calcaires sous l'influence des racines: incidence sur la granulométrie du sol. *Agronomie*. 4 (1): 91-100.
- JOUGLET (J.P.), JACQUIER (C.), 1976.- Recherches sur les écosystèmes montagnards. Etude n°98. INERM-CTGREF. Grenoble, 160 p.
- LEGROS (J.P.), 1975.- Occurrence des podzols dans l'Est du massif Central. *Science du Sol*, 1: 37-49.
- LEGROS (J.P.), CABIDOCHÉ (YM.), 1977.- Les types de sols et leur répartition dans les Alpes et les Pyrénées cristallines. *Doc. Cart. Ecol.*, XIX: 1-19.
- LEGROS (J.P.), ROBERT (M.), van OORT (F.), 1980.- Caractères principaux de la pédogénèse sur calcschistes en montagne. *Science du Sol*, 4: 297-312.
- LEGROS (J.P.), 1982.- L'évolution granulométrique au cours de la pédogénèse. Approche par simulation sur ordinateur. Application aux sols acides sur matériaux cristallins en zone tempérée. Thèse Etat. Univ. Montpellier, 436 p.
- LEPILLER (M.), 1979.- Le rôle de l'activité biologique dans l'acquisition de la charge dissoute des eaux d'aquifères carbonatés: étude sur 12 systèmes karstiques des Bauges et des Bornes. Colloque. Int. CNRS. Migration organo-minérales n°303: 403-411.
- MATHIEU (C.), 1975.- Sur les argiles de décarbonatation de la craie dans le Nord de la France. *Science du Sol*, 3: 183-206.
- MICHALET (R.), 1982.- Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage subalpin dans le Jura. Thèse de Spécialité. Univ. Nancy 1, 103 p.

- MUXART (T.), BIROT (P.), 1977.- L'altération météorique des roches. Dépt. de géographie. Univ. Paris-Sorbonne, 279 p.
- OLIVE (Ph.), 1978.- Le système $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CaCO}_3$. Mémento pratique. Doc. du Centre de Recherches Géodynamiques Thonon-les-Bains. 43 p.
- OORT (F. van), 1984.- Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogenèse. Application à des sols sous prairie et alpage, issus de l'altération des calcschistes sédimentaires en moyenne et haute montagne. Alpes du Nord (Beaufortin). Thèse d'Ingénieur-Docteur. INAPG, 281 p.
- PARTY (J.P.), 1982.- Inter-relations sol-faune en milieu à fortes contraintes. DAA. ENSAM. 76 p. + Annexes.
- PEDRO (G.), 1972.- Les sols développés sur roches calcaires. Nature, originalité et cadre général de leur évolution à la surface du globe. Science du Sol, 1: 5-18.
- PLUMMER (LN), BUSENBERG (E.), 1982.- The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ solution between 0° and 90°C , and an evaluation of the aqueous model for the system $\text{Ca CO}_3\text{-H}_2\text{O}$. Geochim. et cosmochim. Acta. 46: 1 011- 1040.
- POCHON (M.), 1978.- Origine et évolution des sols du Haut-Jura Suisse. Phénomène d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. Thèse Univ. Neuchâtel, 190 p.
- RIEFFEL (P.), 1975.- Etude des sols de la région de Thonon (Haute-Savoie). DEA de Géologie Dynamique. Option pédologie. INAPG- Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 40 p.
- REYDET (V.), 1983.- Etude écologique du fonctionnement de deux secteurs d'alpage du Beaufortin. DEA. Univ. Grenoble, 41 p.
- RICHARD (L.), 1971.- Les conditions de milieu dans diverses séries de végétation de la Chartreuse septentrionale. Actes du colloque sur la flore et la végétation des chaînes alpines et jurassiennes. Ann. litt. Univ. Besançon. Les Belles Lettres, Paris: 17-43.
- RICHARD (L.), 1978.- Carte écologique des Alpes à 1/100 000e. Feuille Chamonix et Thonon-les-Bains. Doc. Cart. Ecol., XX: 1-39.
- SALSAC (L.), 1980.- L'absorption du calcium par les racines des plantes calcicoles ou calcifuges. Science du Sol, 1: 45-77.
- SERY DJEDJE (G.), 1975.- Une séquence de sols sur flysch dans le Chablais (Haute-Savoie). Evolution de la matière organique. DEA. INAPG-ORSTOM, Paris VI, 63 p.
- SOUCHIER (B.), 1971.- Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard. Thèse Etat. Univ. Nancy, 130 p.
- SOMET-DELAIGUE (D.), 1976.- Incidence du faciès pétrographique de quelques roches calcaires sur leur susceptibilité à la dissolution. Thèse de spécialité Univ. Montpellier, 118 p.