



acfas

Association
canadienne-française
pour l'avancement

631.4
P7429
1987

54

Les Cahiers scientifiques

1987

La Podzolisation des sols



Édition : L'Association canadienne-française
pour l'avancement des sciences
2730, chemin de la Côte-Ste-Catherine
Montréal, Québec H3T 1B7

Commandes téléphoniques : L'ACFAS
(514) 342-1411
Les cartes Master Card et Visa
sont acceptées.
Veuillez allouer 2 semaines
pour la livraison.

Commandes postales : L'ACFAS
(adresse ci-haut)

Distribution en librairie : Diffusion Prologue
2975, rue Sartelon
Ville St-Laurent, Québec H4R 1E6
Téléphone : (514) 332-5860
Tél. sans frais : 1-800-361-5751

D8702495

©1987 L'ACFAS
Dépôt légal, 2^e trimestre 1987
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
ISBN : 2-89245-072-1

La Podzolisation des sols

Textes publiés sous la direction de Fernand Pagé,
ministre de l'Agriculture, des Pêcheries
et de l'Alimentation du Québec.





S
592.17
P63 P63
1987

AVANT-PROPOS

Enfin, grâce à la persévérance de quelques pédologues réunis à Chambly en 1984 et à l'intérêt manifesté pour l'avancement de la science du sol au Québec par les conférenciers et participants aux congrès de l'ACFAS tenus en 1985 à Chicoutimi et en 1986 à Montréal, la pédologie a repris sa place au sein de cette association.

En effet, dorénavant les spécialistes de la science du sol au Québec auront la possibilité de se retrouver dans la section de pédologie de l'ACFAS et de travailler ensemble dans l'intérêt de l'utilisation rationnelle des sols du Québec.

L'enthousiasme des chercheurs et des participants exprimé aux deux derniers colloques de l'ACFAS d'une part, ainsi que le nombre et la qualité des articles recueillis dans le cahier no 37 et dans le présent cahier prouvent que les spécialistes de la science du sol au Québec sont définitivement déterminés à faire valoir leurs idées et à mettre leurs connaissances au service de la société québécoise, d'autre part.

D'ailleurs, pour mieux accomplir leur rôle joué sur le plan scientifique, économique et social, ils ont créé l'Association québécoise des spécialistes en science du sol lors du 54e Congrès de l'ACFAS tenu en 1986 à Montréal.

Cette association scientifique, indépendante des corporations professionnelles, se veut d'abord un lieu de rencontres et de prise de positions sur les questions relatives à la science, à l'utilisation, à l'aménagement et à la conservation des sols.

Elle a pour objectifs de diffuser l'information scientifique et technique concernant l'utilisation rationnelle de l'un de nos patrimoines: LE SOL.

Tout diplômé universitaire oeuvrant en science du sol au Québec peut devenir membre de l'Association à condition d'en faire la demande, d'être admis par le Comité d'admission et de payer la cotisation fixée par l'Assemblée générale.

En ce qui concerne la structure et les modes d'adhésion, l'exécutif de cette association se propose de les faire connaître, avant le 55e Congrès de l'ACFAS, par la distribution d'une brochure qui est en préparation.

Dans l'attente de vous retrouver parmi nous au prochain congrès de l'ACFAS qui aura lieu à Ottawa, je vous souhaite une lecture agréable et enrichissante.

Le Président de l'Association
québécoise des spécialistes en
science du sol

MARTON TABI, Ph.D.
agronome

TABLE DES MATIERES

PAGES

Avant-propos.....	1
M. Tabi	
Table des matières.....	3
Ouverture du colloque.....	4
F. Pagé	
Fonctionnement actuel des sols podzolisés du Québec.....	6
F. Pagé	
Caractérisation minéralogique et chimique des podzols.....	45
C. R. De Kimpe	
Humic-clay interactions in soil, and in particular podzol, processus..	64
S. A. Visser	
Micro-relief, dynamique et évolution des sols au Québec méridional..	91
J.-L. Brown	
L'évolution des critères diagnostiques des sols podzoliques dans la classification canadienne des sols.....	105
R. W. Baril et J. A. McKeague	
La classification et la cartographie des sols du Québec.....	132
L. Tardif	
Le langage des sols podzolisés: pour une nouvelle vision terminolo- gique.....	140
C. Laverdière	
Les sols podzolisés sur le territoire français: distribution, mor- phologie et genèse.....	148
D. Righi, M. Jamagne et O. Duval	
Compte rendu de la table ronde sur l'évaluation des sous-groupes de sols podzolisés.....	167
J. M. Cossette	

OUVERTURE DU COLLOQUE

Fernand Pagé

Service de recherche en sols, MAPAQ
2700 rue Einstein, Ste-Foy
Québec, G1P 3W8

Sous les conditions climatiques froides et humides du Québec, le processus pédogénétique habituel mis en cause est celui de la podzolisation. Son importance est considérable et les implications sont nombreuses tant sur le plan des transformations du sol que sur le plan de la productivité agricole. En effet, les processus de la podzolisation entraînent dans un temps relativement court l'acidification des sols, et leur appauvrissement en éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes. Ce phénomène a donc pour conséquence de diminuer la production agricole et, par le fait même, d'occasionner aux agriculteurs des investissements financiers importants pour l'amendement des sols.

Les efforts donnés par les chercheurs oeuvrant en science du sol pour trouver des solutions aux problèmes de fertilité, de cartographie et de classification des sols podzolisés sont importants. Ce colloque réalisé dans le cadre du 54^e Congrès de l'ACFAS, a donc été organisé pour nous permettre de confronter les concepts et les méthodes développés au cours des dernières décennies sur la podzolisation des sols.

Les thèmes du colloque qui sont proposés se situent au coeur même des problèmes rencontrés par les pédologues québécois: étude du fonctionnement, processus d'évolution, aménagement, cartographie et classification des sols podzolisés. Plusieurs scientifiques, pédogénéticiens, minéralistes, biochimistes, agronomes, biologistes, ingénieurs, vous convient donc à ce rassemblement interdisciplinaire.

A la fin de cette journée, une table ronde prolonge les communications, et les participants pourront alors discuter librement de problèmes ou d'expériences liés à la cartographie et la classification des sols podzolisés.

Avant de donner la parole aux conférenciers, je tiens à transmettre mes remerciements à Monsieur Camille Laverdière, professeur au Département de Géographie de l'Université de Montréal, qui, par son aide et son efficacité, a largement contribué à l'organisation de ce colloque.

F. Page¹

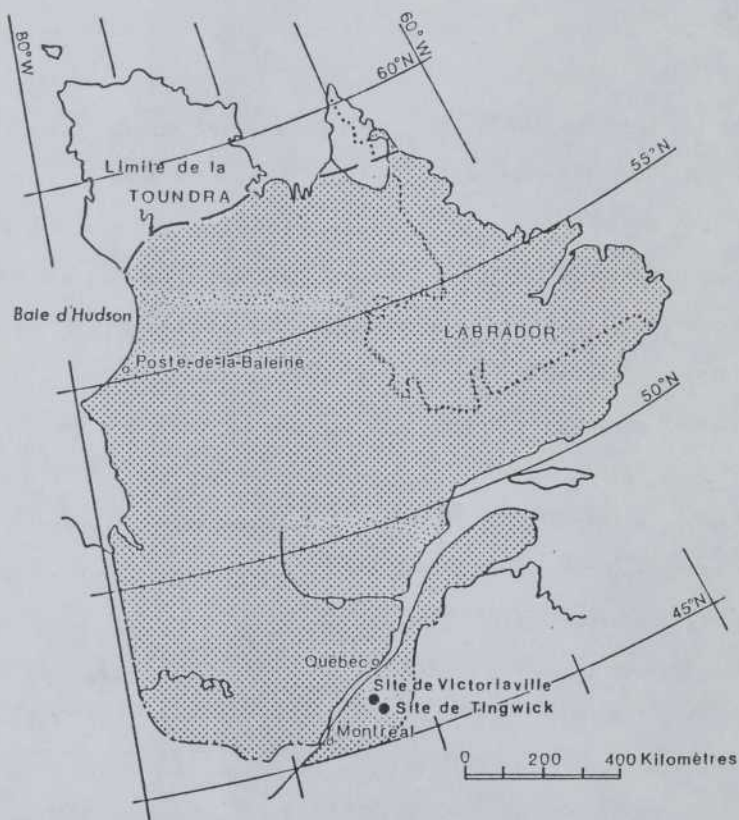
RESUME

Des lysimètres ont été installés dans des podzols sableux de Sainte-Sophie et d'Hemming-Falls de la plaine du Saint-Laurent, et dans des podzols loam sableux de Leeds des collines appalachiennes, afin d'étudier le fonctionnement actuel de ces sols. Les sols à l'étude se développent sous des conditions climatiques et une végétation relativement semblables. L'analyse en C organique, Fe, Al, Si, Ca, K et Mg des percolats de L-F-H-Ah et de Ae ainsi que des eaux de nappe et de ruisseau, indiquent que la podzolisation agit sur les sols au cours de deux périodes principales: le printemps et l'automne. Au cours de ces périodes le C organique, Fe et Al s'accumulent préférentiellement dans les horizons B alors que les autres éléments sont évacués hors du profil. Cependant, une partie importante de Fe et Al qui migre vers les horizons B, provient des horizons L-F-H-Ah plutôt que des horizons Ae. Ces résultats montrent donc l'importance du cycle biogéochimique dans l'édification de nombreux horizons B podzoliques. L'auteur estime même que la plupart des horizons B podzoliques des sols des Appalaches ne pourraient se développer sans le cycle biogéochimique. Mais celui-ci n'étant pas exclusif aux sols podzolisés, on ne devrait pas attacher une trop grande importance à la présence des complexes Fe-Al dans des horizons podzoliques pour caractériser les sols podzolisés.

¹Service de recherche en sols, MAPAQ, 2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1P 3W8

Le climat froid et humide qui règne au Québec depuis la dernière glaciation est un des facteurs qui a le plus contribué au développement des sols podzolisés (fig. 1). Sous de telles conditions, les végétaux morts qui s'accumulent à la surface des sols acides et filtrants, ou encore les racines mortes à certaines profondeurs, se dégradent lentement pour donner d'importantes quantités de composés organiques simples solubles, acides aliphatiques, acides et polymères phénoliques (Bruckert 1970; Duchaufour 1977). Ces composés organiques migrent dans le sol minéral, et, grâce à leur pouvoir complexant et leur propriété acide, y dégradent les produits inorganiques pour former avec le fer et l'aluminium des complexes organo-métalliques (Soil Survey Staff 1975). Toutefois, d'après Robert et al. (1979), ces acides organiques simples, de poids moléculaire généralement inférieur à 300, ont une existence très éphémère, et se transforment rapidement par polycondensation en des composés organiques polymérisés, comme par exemple, les acides fulviques et humiques. Ces derniers interviendraient principalement dans le transport du fer et de l'aluminium à l'intérieur du solum, parfois même très loin du solum, mais n'ont pas les propriétés agressives des composés organiques simples. Une partie importante du fer et de l'aluminium ainsi libérée de la structure cristalline des minéraux, et se retrouvant ensuite dans les complexes organo-métalliques sous forme d'anions Fe^{++} , Fe^{+++} , $Fe(OH)^{++}$, $Fe(OH)_2^+$, Al^{+++} et $Al(OH)_2^+$ (Védy et Bruckert 1979), passe, sous l'action de la biodégradation des composés organiques (Fortin 1972), ou encore au cours des processus saisonniers "polymérisation-dépolymérisations" des acides fulviques et humiques (Turenne 1975), de l'état de complexe à l'état d'hydroxyde amorphe, voire même à l'état cristallisé. Les travaux de Farmer (1981), ont également confirmé la

Figure 1: Localisation des sites étudiés (●) et des régions touchées par la podzolisation des sols [hatched box]



présence d'une migration sous forme colloïdale d'hydroxydes de fer et d'aluminium sans support organique. Leur accumulation à différents niveaux dans le sol s'ajoute donc à celle des complexes; Farmer (1981) estime même que ces formes colloïdales pourraient se transformer et établir des liaisons avec la matière organique.

Sous l'action de ces mécanismes podzoliques, le sol acquiert une morphologie particulière. De haut en bas du profil, plusieurs horizons se développent:

- une couche holorganique (L-F-H) de type mor ou moder, constituée de tissus en voie de décomposition,
- un horizon Ah généralement peu épais (< 10 cm), de couleur brun foncé à noir,
- un horizon Ae d'épaisseur variable, de couleur blanc cendré,
- des horizons B de couleur brun jaune à plus foncé, à structure polyédrique et/ou granulaire, ou massive, pouvant être cimentés dans ce dernier cas.

La matière organique provenant des horizons holorganiques est entraînée par l'eau de gravité vers les horizons plus profonds. La matière organique à poids moléculaire élevé précipite dans l'horizon Ah, alors que celle à poids moléculaire plus faible migre vers l'horizon Ae. Les minéraux sont dans ce dernier horizon, dégradés et des cations sont libérés. Ces cations ainsi que la matière organique migrent ensuite vers les horizons B; le fer, l'aluminium et la matière organique s'y accumulent, alors que les autres cations sont en partie évacués hors du profil.

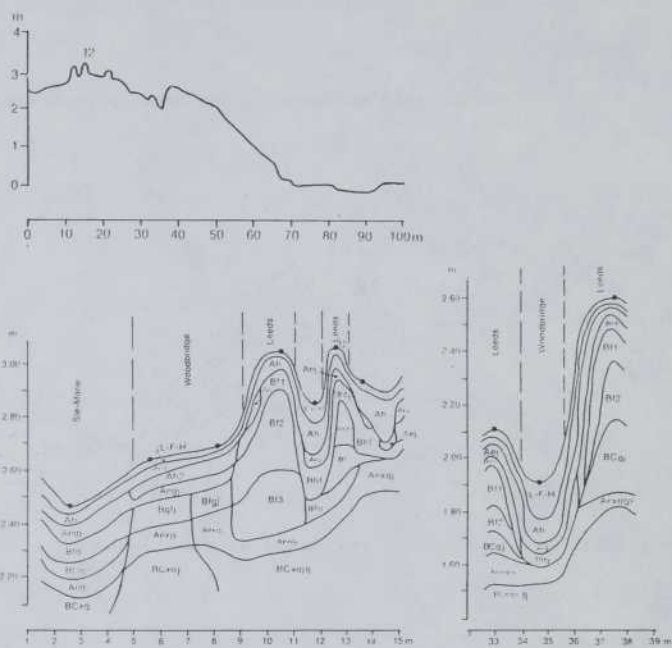
Ce modèle dynamique de la podzolisation des sols a été élaboré principalement à partir d'études réalisées sur les composés complexes et non complexes de néogénèse accumulés dans les horizons B podzoliques.

Parce que l'on croit que ces composés se sont formés grâce à des mécanismes de lixiviation dans l'horizon Ae, leur abondance dans les horizons B podzoliques sert de critères de caractérisation des sols podzolisés (Commission de Pédologie et de Cartographie des sols 1967, Soil Survey Staff 1975, Commission Canadienne de Pédologie 1978, Avery 1980). Mais, quelques travaux basés sur l'étude des solutions percolantes dans le sol indiquent que des mécanismes racinaires joueraient un rôle important sur l'altération des minéraux dans les horizons B des sols podzolisés et sur l'accumulation du fer et de l'aluminium dans ces mêmes horizons (Juste 1965, Brooks 1972, Védý et Bruckert 1979, Belousova 1981, Guillet et al. 1981, Nys et al. 1981, Pagé 1983, Dufresne et Hendershot 1985). Si l'importance du cycle biogéochimique dans des sols podzolisés était confirmée, il serait donc nécessaire de modifier les critères actuels de caractérisation des sols podzolisés, critères dont le caractère sélectif est d'ailleurs mis en doute par un grand nombre d'auteurs (Higashi et al. 1981, Daly 1982, McKeague et al. 1983, Mokma 1983, Goldin 1983). C'est pourquoi une étude des solutions percolantes dans des sols podzolisés du Québec est réalisée dans le présent travail dans le but de mieux connaître le fonctionnement actuel de ces sols.

MATERIEL ET METHODES

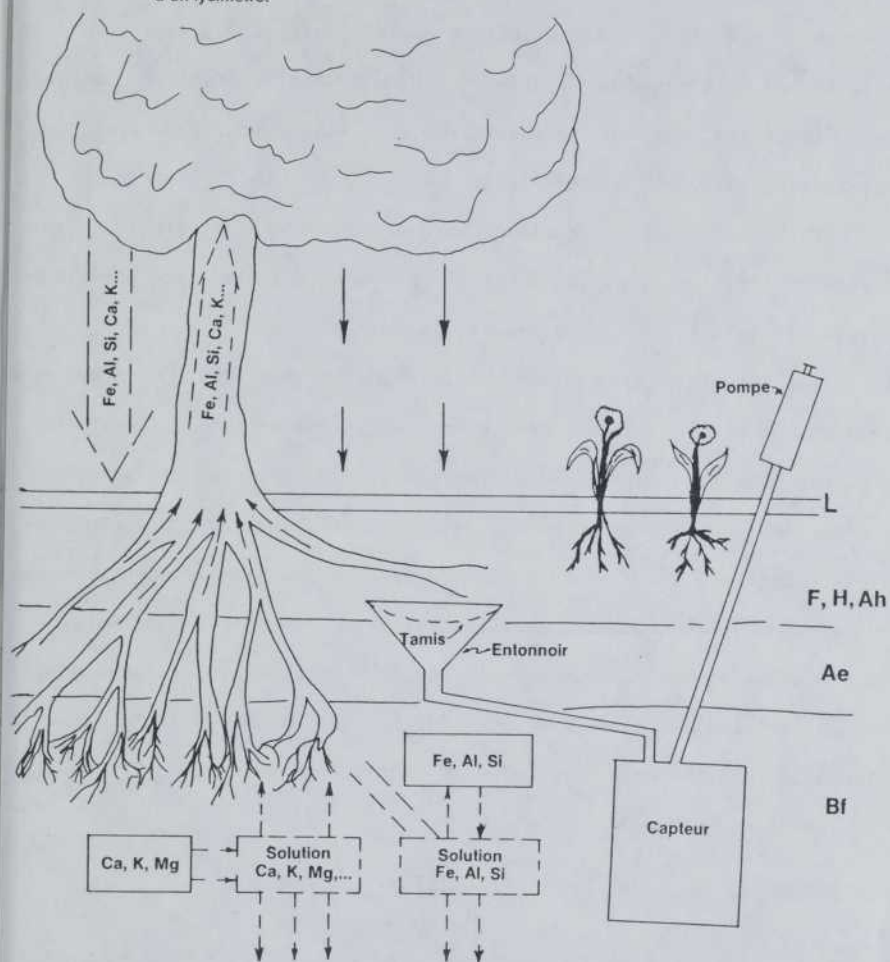
Les stations lysimétriques ont été installées sur des sols de Sainte-Sophie et d'Hemming-Falls situés près de Victoriaville ($45^{\circ}57' N$, $72^{\circ}56' O$) dans la plaine du Saint-Laurent (fig. 2), et sur des sols de Leeds situés près de Tingwick ($45^{\circ}50' N$, $71^{\circ}50' O$) dans les collines des Appalaches (fig. 3). Une végétation mixte se développe sur ces sols. Huit lysimètres formés d'un petit entonnoir recouvert d'un tamis 100

Figure 3: Représentation schématique des sols du site de Leeds



12 : Station lysimétrique du sol de leeds

Figure 4: Représentation schématique du cycle biochimique et d'un lysimètre.



mesh et reliés à un capteur d'eau (fig. 4), ont été placés sous la couche L-F-H-Ah de ces sols. Huit lysimètres ont également été placés sous l'horizon Ae des sols de Sainte-Sophie et d'Hemming-Falls. Dans les sols de Leeds, l'horizon Ae est d'épaisseur trop irrégulière pour permettre une installation adéquate de lysimètres.

Des puits d'accès ont été aménagés dans chacune des stations lysimétriques afin de mesurer les fluctuations du toit de la nappe phréatique. Des pluviomètres y ont été également placés.

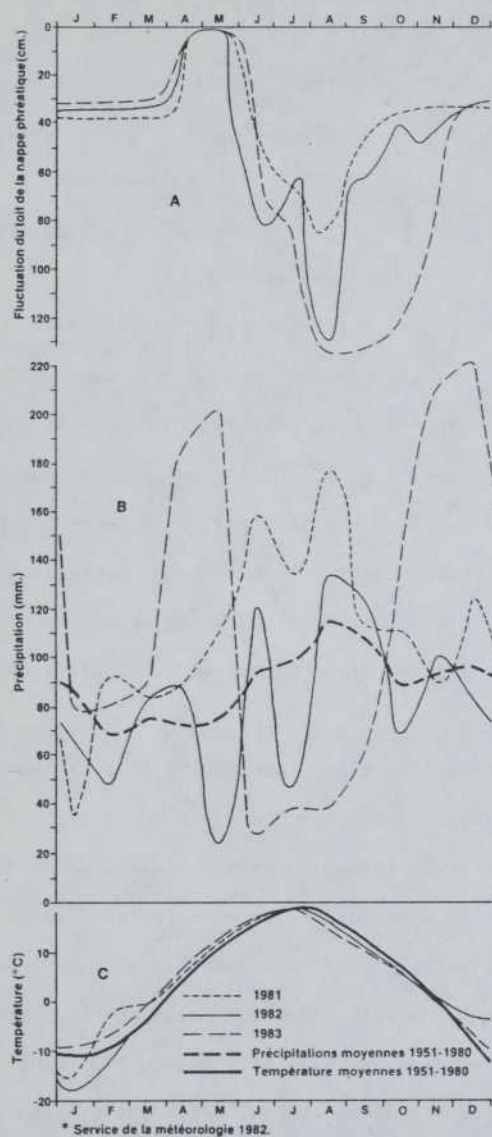
Les percolats ont été recueillis régulièrement, deux jours environ après chaque pluie, au cours des années 1981, 1982 et 1983. La hauteur de la nappe et la quantité d'eau dans les pluviomètres ont été mesurées en même temps que les prélèvements des percolats. Les eaux ont été passées sur filtre 0,45 un moins de 24 heures après leur prélèvement, puis congelées jusqu'au moment de leur analyse. Les teneurs en C organique ont été mesurées à l'aide de l'analyseur de C total et inorganique de Beckman, modèle 315, alors que celles de Fe, Al, Si, Ca, K et Mg ont été obtenues au spectromètre d'émission au plasma. Le pH des eaux recueillies a également été mesuré.

RESULTATS

Climat

Les conditions climatiques des régions de Victoriaville et de Tingwick sont relativement semblables (Service de la Météorologie 1982). Les valeurs des précipitations météoriques et des températures pour les années 1981, 1982 et 1983 oscillent autour des moyennes établies sur 30 années (fig. 5). On constate également que l'abaissement du toit de la nappe en 1982 s'est effectué jusqu'à un niveau intermédiaire, entre ceux atteints en 1981 et 1983; 1981 ayant été un peu plus sec que 1982, et

Figure 5: Évolution des précipitations (B) et de la température (C) à la station météorologique de Victoriaville, et fluctuation de la nappe phréatique (A) du site de Victoriaville.



1983 plus humide.

Les pluviomètres des stations lysimétriques sont situés sous un épais couvert forestier, et, de ce fait, ont intercepté en moyenne au cours des mois de mai à octobre, 22% moins de précipitation qu'aux stations météorologiques avoisinantes. Ces résultats confirment ceux de Nys et al. (1981), qui ont observé également une interception des précipitations météoriques de cet ordre par les arbres.

La température moyenne journalière s'élève au-dessus de 0°C au début du mois d'avril (fig. 5). A la mi-mai, elle s'est élevée au-dessus de 10°C, pour atteindre et parfois même dépasser 20°C au mois de juillet. Puis elle a diminué graduellement à partir du mois d'août pour atteindre 10°C à la fin septembre. Les premières gelées nocturnes sont apparues également vers la fin de ce mois. La température moyenne journalière est retombée sous le seuil de 0°C vers la fin de novembre. Il y a peu de différence entre les températures moyennes annuelles et celles calculées sur 30 ans.

Les sols de Victoriaville et de Tingwick ont gelé au cours de l'hiver 1982 sur une profondeur maximale d'environ 50 cm (tab. 1). Pour les sols de Sainte-Sophie et de Leeds, l'humus a dégelé vers le 5 avril, pour geler à nouveau dans la seconde semaine de novembre. Les horizons Ae et B ont dégelé à la mi-avril, pour geler vers le 20 novembre. L'humus et les horizons Ae et B des sols d'Hemming-Falls ont subi les effets du gel comme pour les sols mieux drainés, mais ces horizons ont dégelé à la fin mars, pour geler vers la mi-novembre. Ces résultats indiquent donc que, dans les sols bien drainés, les lysimètres ont intercepté les eaux de gravité ou de nappe entre le début avril et la mi-novembre (fig. 6).

Figure 6: Quantité d'eau de gravité interceptée à la station lysimétrique de Victoriaville pour l'année 1982.

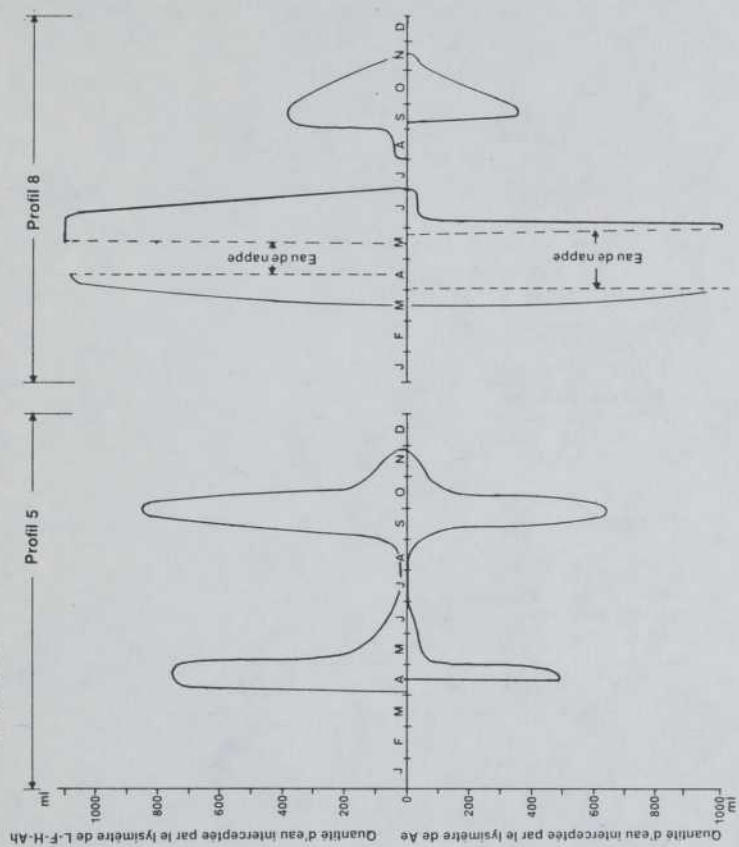
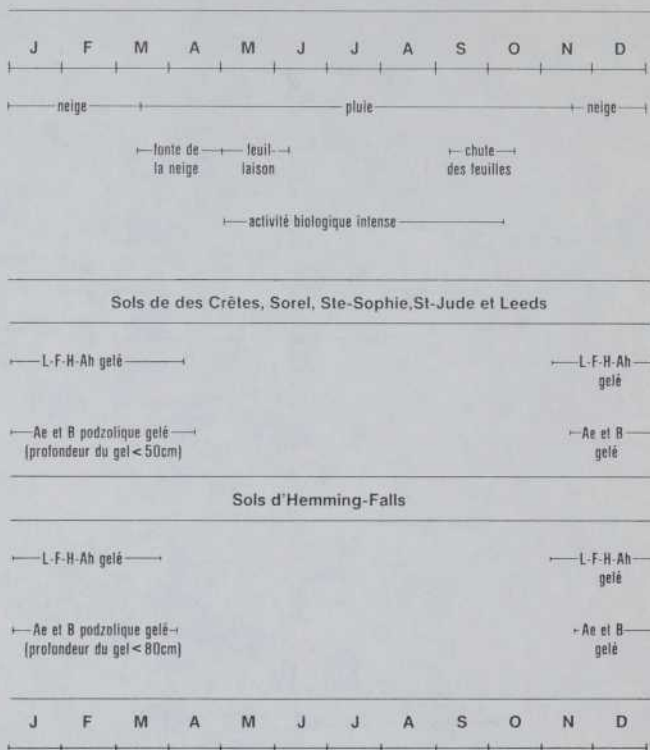


Tableau 1: Influence du climat sur les sols des sites de Victoriaville et de Tinwick au cours de l'année 1982



Fluctuations saisonnières du toit de la nappe phréatique

Au site de Victoriaville, le toit de la nappe phréatique est horizontal. Le matériel originel constitué de sable moyen occasionne une remontée faible et uniforme de la nappe par capillarité. D'après Féodoroff (1972), cette frange capillaire serait dans ces conditions d'environ 40 cm d'épaisseur. La figure 5 montre que le niveau le plus élevé du toit de la nappe est atteint au printemps, généralement entre le début mai, immédiatement après la fonte de la neige, et ce niveau est maintenu ainsi jusqu'à la fin mai environ. Quelle que soit l'année, ce niveau maximal est constant puisqu'il correspond au niveau d'inondation (niveau 0).

Puis, peu à peu, le toit de la nappe s'abaisse pour atteindre un minimum au début d'août. Bien que ce minimum soit fonction de l'importance des précipitations estivales, il se situe généralement sous les horizons B podzoliques des sols situés dans les creux du relief. La nappe remonte ensuite entre le début septembre et la fin novembre, et atteint un plateau qui est conservé jusqu'au printemps suivant. Le niveau de ce plateau peut être différent d'une année à l'autre, mais les variations ne sont généralement que de quelques cm. Il importe également de remarquer que, dans les sols situés dans les dépressions, les horizons Ae se développent au-dessus de ce dernier niveau.

Au site de Tingwick, la nappe phréatique ne s'élève pas jusqu'au solum. Cependant, on observe après de fortes pluies, ou juste après la fonte de la neige, une nappe perchée au-dessus de l'horizon fragique, horizon qui se développe à environ 50 cm de profondeur. Cette nappe est généralement présente du mois d'avril jusqu'à la fin mai environ. Elle apparaît ensuite de façon intermittente au cours de l'été et de l'automne, après des précipitations importantes. On a également noté au cours de ces mêmes périodes, un suintement entre les unités prismatiques très

grossières des horizons fragiques.

Evolution saisonnière de l'eau de gravité et de nappe

Bien que cette étude ait été réalisée au cours de trois années successives, seules les données relatives à l'année 1982 sont utilisées ici pour connaître l'évolution saisonnière de l'eau dans le sol, car le climat de cette année fut assez représentatif du climat habituel de cette région (fig. 5). Cette façon de procéder permet le traitement des données lysimétriques à partir de profils réels, et non de profils moyens.

A. Bilan de l'eau de gravité interceptée par les lysimètres

Un bilan précis des quantités d'eau interceptées par les lysimètres est difficile à réaliser car :

- il peut se produire des phénomènes d'interface entre le lysimètre et le sol,
- une accumulation de constituants fins s'effectue souvent à la surface des lysimètres, limitant ainsi la pénétration de l'eau,
- l'installation du lysimètre entraîne des modifications du régime hydrique du sol.

On ne peut donc donner qu'une appréciation semi-quantitative de l'eau qui circule dans le sol.

Dans le sol de Sainte-Sophie, la quantité d'eau de gravité interceptée en 1982 par les lysimètres de la couche L-F-H-Ah est d'environ 20 à 30% supérieure à la quantité d'eau interceptée par les lysimètres de l'horizon Ae (fig. 6). Au printemps, soit de la mi-avril au début mai, les quantités d'eau interceptées par les lysimètres de L-F-H-Ah et Ae sont relativement élevées. Mais l'été, elles diminuent considérablement entre le début juillet et le 15 août, et sont mêmes nulles dans le

cas du lysimètre de Ae. Elles augmentent ensuite très fortement pour atteindre un maximum à la fin septembre, puis diminuent jusqu'aux premières neiges, à la mi-novembre.

Dans le sol d'Hemming-Falls, l'eau de nappe submerge le sol au printemps (fig. 2 et 6). Ainsi, du 15 avril environ à la fin mai, l'eau interceptée par les lysimètres est celle de la nappe phréatique. A partir de la fin mai, l'eau interceptée est celle qui circule par gravité; on note alors, comme pour le sol de Sainte-Sophie, des quantités d'eau dans les lysimètres de Ae. Puis les quantités décroissent rapidement jusqu'à la fin juin. Entre cette date et la fin juillet, l'eau de gravité n'atteint pas les lysimètres. En août et début septembre, seuls les lysimètres de L-F-H-Ah interceptent des solutions; mais au delà de cette période, l'eau de gravité est interceptée à nouveau par le lysimètre de Ae. Il est intéressant de noter que, contrairement aux sols mieux drainés, les quantités d'eau de gravité interceptées à l'automne sont inférieures à celles interceptées au printemps.

Ces observations indiquent donc qu'il existe une perte en eau dans la partie supérieure des sols, perte qui, d'après Nys et al. (1982), peut être occasionnée par des processus d'évaporation, d'absorption racinaire et de rétention par les constituants du sol. Ces processus sont plus intenses au cours de l'été; la végétation étant très active, l'eau de pluie qui pénètre le sol n'atteint généralement pas l'horizon B, parfois même pas l'horizon Ae lorsque celui-ci est présent.

B. Bilan des éléments en migration dans le sol

La mesure du volume d'eau qui circule dans le sol étant peu précise, on ne peut pas calculer avec précision les quantités d'éléments (t/ha) qui migrent. C'est pourquoi dans les figures 7, 8 et 12, les quantités d'éléments en migration sont exprimées en quantité relative,

Figure 7: Concentrations saisonnières en éléments des percolats pour l'année 1982.
Profil de Ste-Sophie

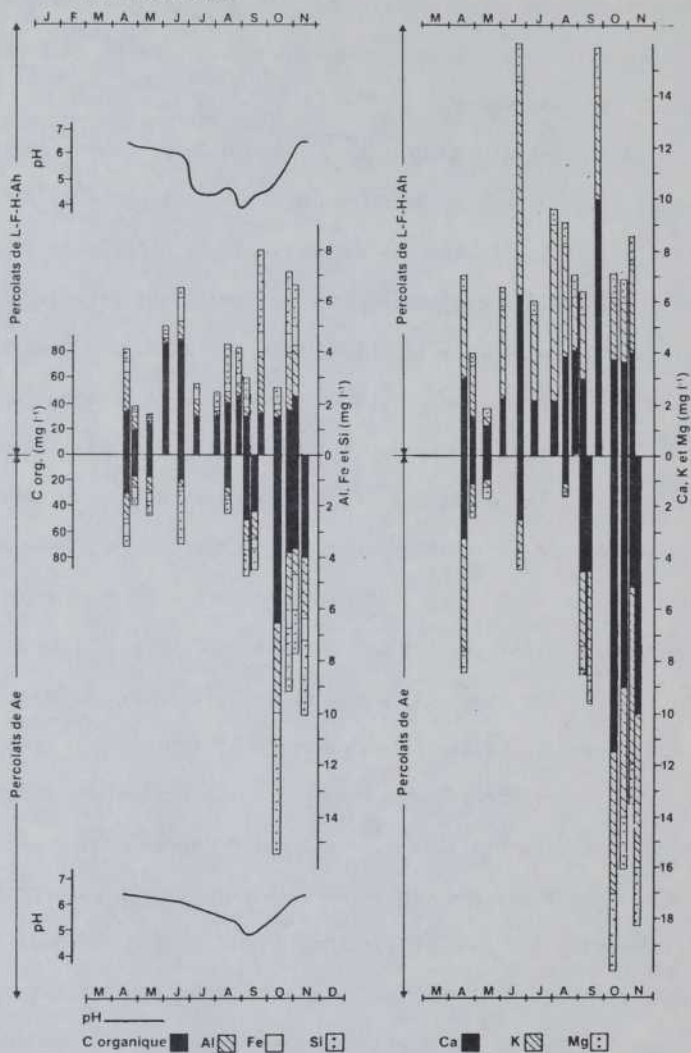


Figure 8: Concentrations saisonnières en éléments des percolats pour l'année 1982.
 Profil d'Hemming-Falls

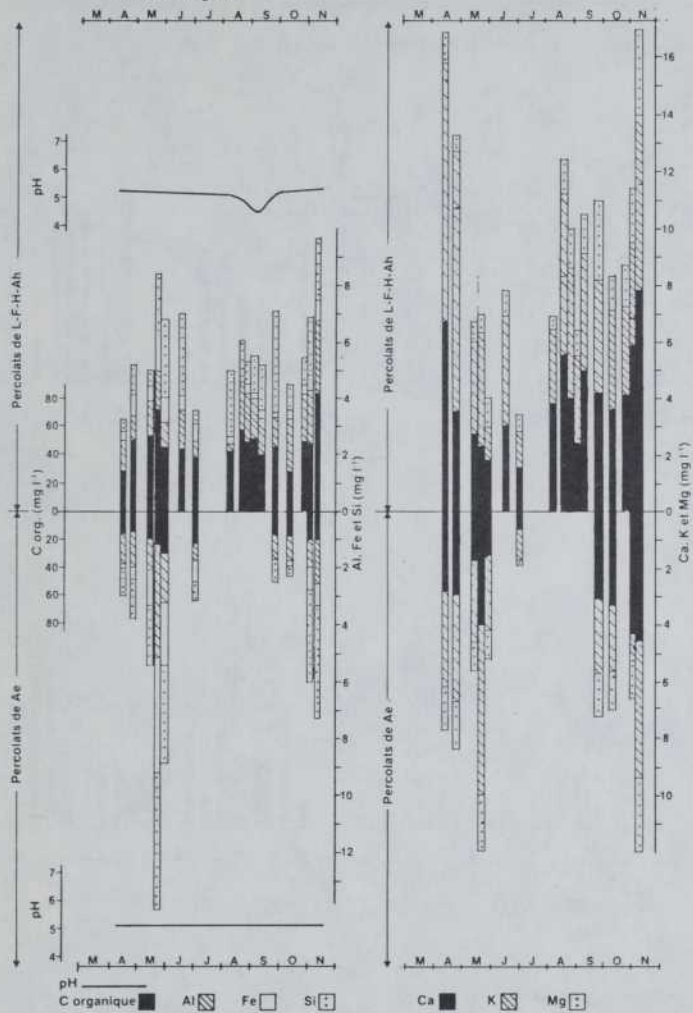


Figure 9: Concentration saisonnière en éléments des eaux de la nappe phréatique pour l'année 1982.
 Profil a) de Ste-Sophie et b) d'Hemming-Falls

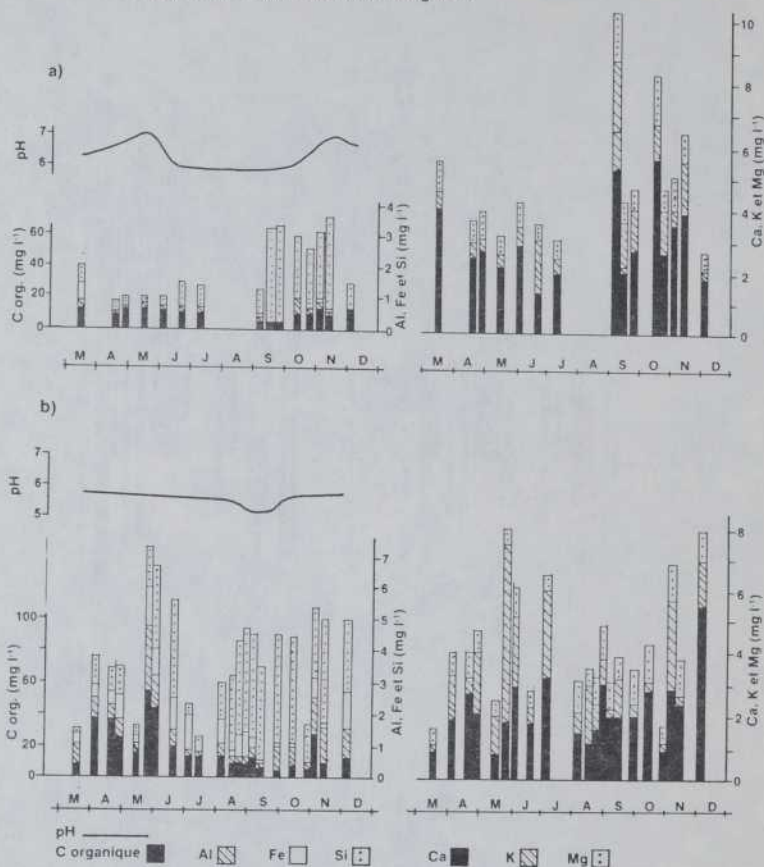
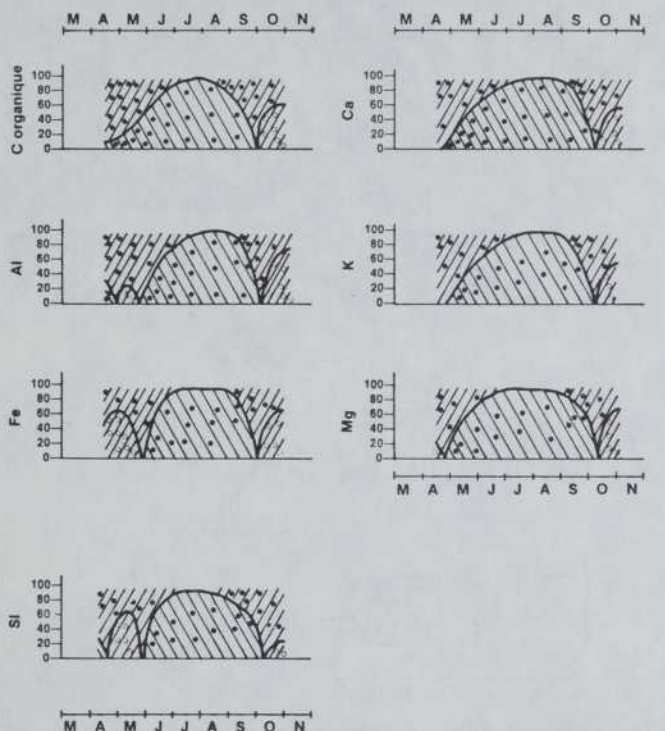






Figure 10: Pourcentages relatifs des éléments qui proviennent des horizons L-F-H-Ah et Ae, et qui migrent vers les horizons Ae et B podzoliques (Sol de Ste-Sophie, profil 5)



-  Pourcentage relatif de l'élément qui provient de L-F-H-Ah et qui migre vers les B podzoliques.
-  Pourcentage relatif de l'élément qui provient de Ae et qui migre vers les B podzoliques.
-  Pourcentage relatif de l'élément qui provient de L-F-H-Ah et qui s'accumule dans Ae.
-  Pourcentage relatif de l'élément qui provient de L-F-H-Ah et/ou Ae, et qui migre vers les horizons B podzoliques.

$$\left[\begin{array}{l} = 100 \text{ si } A > B \\ = A/B \times 100 \text{ si } A < B \\ = 0 \text{ si } A > B \\ = 100 - (A/B \times 100) \text{ si } A < B \\ = 0 \text{ si } A < B \\ = 100 - (B/A \times 100) \text{ si } A > B \\ = 0 \text{ si } B = 0 \\ = 100 \text{ si } A < \text{ou} = B \\ = B/A \times 100 \text{ si } A > B \end{array} \right.$$

A = concentration de l'élément dans les percolats de L-F-H-Ah (mg l^{-1}).

B = concentration de l'élément dans les percolats de Ae (mg l^{-1}).

Figure 12: Concentrations saisonnières en éléments des percolats de L-F-H-Ah pour l'année 1982. Profil de Leeds

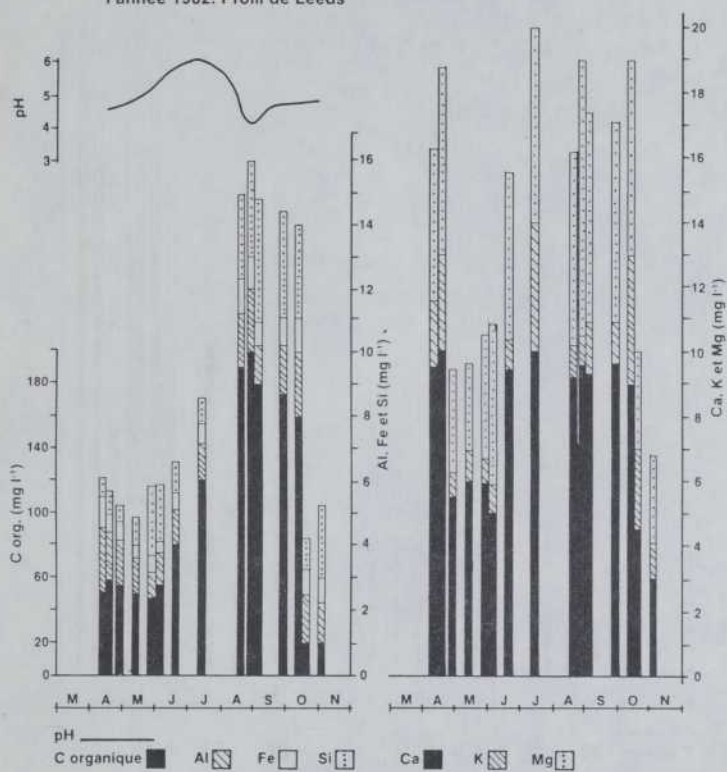
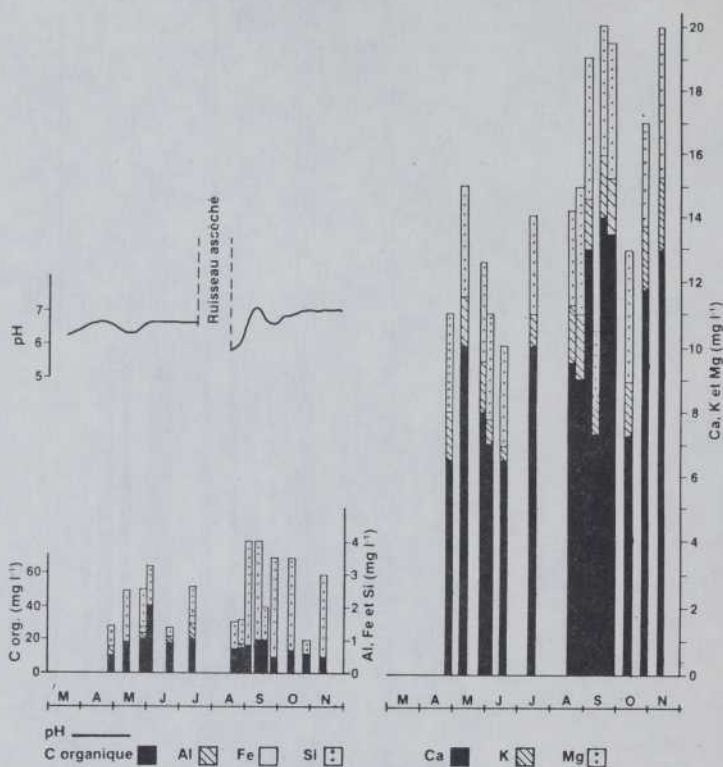


Figure 13: Concentrations saisonnières en éléments des eaux de ruisseau pour l'année 1982, site de Tingwick.



c'est-à-dire en concentration d'éléments par unité de volume de solution percolante. Cette façon de procéder permet de suivre l'évolution des solutions dans le sol au cours des saisons (fig. 10 et 11): après une pluie si la concentration du percolat de L-F-H-Ah est plus élevée que celle du percolat de Ae, une certaine quantité de ces éléments a précipité dans l'horizon Ae lorsque l'eau de gravité y a circulé; à l'inverse, si la concentration du percolat de L-F-H-Ah est plus faible que celle du percolat de Ae, il y a lixiviation importante d'éléments dans l'horizon Ae. D'autre part, lorsque l'horizon Ae est absent ou de faible épaisseur (cas de plusieurs sols de Leeds), les éléments qui migrent vers les horizons B podzoliques proviennent principalement de la couche L-F-H-Ah.

Tenant compte de ces observations, et à la lumière des données météoriques présentées précédemment, on reconnaît trois périodes principales entre les mois de mars et décembre au cours desquelles plusieurs mécanismes ont marqué le développement des sols: période du dégel des horizons, période d'activité biologique intense et période d'activité biologique faible. De décembre à mars, la partie supérieure des sols est le plus souvent gelée.

Période du dégel des horizons:

a. du 5 au 15 avril

Sols bien drainés

Au cours de cette période dans les sols de Sainte-Sophie et de Leeds, la couche L-F-H-Ah n'était plus gelée, alors que les horizons sous-jacents Ae et B podzoliques l'étaient encore (tab. 1). Une circulation de l'eau de gravité dans l'humus vers les points les moins élevés du terrain s'est donc ajoutée à celle de l'eau de ruissellement.

Ainsi, au cours de cette période, l'eau de fonte, bien qu'elle soit abondante, n'atteint pas le sol minéral, ni l'eau de nappe. C'est donc une période de migration latérale des éléments à la surface du sol ou dans les horizons holorganiques, des points les plus élevés aux points les plus bas du relief.

Sols mal drainés

Dans les sols mal drainés d'Hemming-Falls, les horizons sont dégelés depuis la fin mars, soit un peu plus tôt que dans les sols mieux drainés, mais la nappe n'a pas atteint son niveau maximal d'élévation (niveau 0). Les solutions percolantes vont donc favoriser une lixiviation de nombreux éléments vers les horizons plus profonds, et également vers la nappe phréatique, car celle-ci se rapproche de plus en plus de la surface du sol. Les éléments que l'on retrouve dans la nappe au cours de cette période, placés dans l'ordre décroissant d'importance, sont les suivants (fig. 9b): C, Ca, K, Si, Mg, Al et Fe; ces éléments proviennent non seulement des horizons supérieurs, mais aussi des horizons holorganiques alors dégelés des sols mieux drainés situés en position plus élevée du relief.

b. du 15 avril à la feuillaison

Sols bien drainés

Le dégel des horizons Ae et B podzoliques dans les sols de Sainte-Sophie et de Leeds est survenu au cours de cette période. Dans les premiers, les percolats de Ae ont des concentrations en éléments semblables ou légèrement inférieures à celles des percolats de L-F-H-Ah (fig. 7); l'eau de gravité n'a donc perdu qu'une faible quantité d'éléments en traversant l'horizon Ae. D'une façon générale, les percolats contiennent

alors par ordre décroissant d'importance, les éléments C, K, Ca, Al, Mg, Si et Fe. Dans la nappe, cet ordre est cependant modifié (fig. 9a) et l'on retrouve C, Ca, Mg, K, Al, Si et Fe. Les pH des solutions sont alors les plus élevés de l'année.

Si l'on compare les éléments des percolats un à un (fig. 10), on constate d'une part que le C organique, Ca, K, et Mg en solution dans le sol de Sainte-Sophie sont issus des horizons holorganiques et s'accumulent à la fois dans l'horizon Ae, les horizons B podzoliques et probablement la nappe phréatique, et d'autre part que le Fe, Al et Si sont issus à la fois des horizons holorganiques et Ae et s'accumulent dans les horizons B podzoliques et la nappe.

Les percolats de la couche L-F-H-Ah du sol de Leeds contiennent au cours de cette période, par ordre décroissant d'importance, les éléments suivants: C, Ca, Mg, Al, K, Fe et Si (fig. 12). Dans l'eau de ruisseau du site de Tingwick (fig. 13), ces éléments sont dans l'ordre décroissant d'importance C, Ca, Mg, K, Si, Al et Fe. Les solutions de ce site se distinguent de celles du site de Victoriaville par des concentrations plus élevées en éléments, plus particulièrement en C organique, magnésium et calcium. La présence en grande abondance de micas et de chlorite dans les sols de Leeds explique l'importance de Mg et Ca retrouvée dans les solutions. Contrairement à l'eau de nappe du site de Victoriaville, les percolats et les eaux de ruisseau des sols de ce site ont en cette période, les pH relativement bas.

Sols mal drainés

Les sols mal drainés sont submergés (fig. 2 et 6) au cours de cette période. L'abondance relative des éléments dans l'eau de nappe varie en fonction de la profondeur. Au niveau de la surface du sol (fig.

9b), les concentrations de C, K, Ca, Si, Mg, Fe et Al, placés ici dans l'ordre décroissant d'importance, sont relativement peu élevées. Dans la couche L-F-H-Ah (fig. 8), les éléments C, K, Ca, Mg, Si, Al et Fe, placés dans l'ordre décroissant d'importance, sont en plus forte concentration. Dans l'horizon Ae (fig. 8), les éléments sont dans les mêmes proportions que dans la couche L-F-H-Ah mais n'y sont pas aussi abondants.

Les sols mal drainés d'Hemming-Falls sont donc caractérisés au cours de cette période par des mécanismes de solubilisation dans chacun des horizons. Les quantités des éléments solubilisés varient fortement en fonction des horizons, et on note que la diffusion verticale de ces éléments est de faible importance.

Période d'activité biologique intense

Sols bien drainés

En période plus chaude d'activité biologique intense, soit de la feuillaison (15 mai) au début de la période de la chute des feuilles (début septembre), l'eau de gravité n'atteint que rarement les horizons B dans les sols de Sainte-Sophie et de Leeds. Les éléments en migration s'accablent donc préférentiellement dans l'horizon Ae (fig. 10) ou Ah. Les horizons B subissent alors une forte dessiccation, mais sur une période assez brève (une à trois semaines). En général, dans les sols de Sainte-Sophie, les proportions relatives des éléments dans les percolats de L-F-H-Ah et de Ae ainsi que dans l'eau de nappe, sont respectivement dans l'ordre décroissant d'importance les suivantes: C, K, Ca, Mg, Si, Al et Fe, C, Ca, K, Si, Mg, Al et Fe, et C, Ca, K, Mg, Si, Al et Fe. Dans les sols de Leeds, on retrouve dans l'ordre décroissant d'importance C, Ca, Mg, Si, Al, K et Fe. L'eau de ruisseau du site de Tingwick contient ces éléments dans les mêmes proportions que pour la pé-

riode précédente. Le pH de l'ensemble des solutions s'abaisse.

Sols mal drainés

Dans les sols podzolisés mal drainés d'Hemming-Falls, le toit de la nappe s'abaisse rapidement à partir de la feuillaison (fig. 5). La faible densité racinaire dans ces sols limite considérablement l'absorption de l'eau par les végétaux, et les sols restent relativement humides. L'eau de pluie est donc peu absorbée à la fois par les végétaux et les constituants du sol lorsqu'elle pénètre le sol, et c'est pourquoi de grandes quantités de solution sont interceptées par les lysimètres jusqu'à la fin juin (fig. 6). Au cours de cette période, l'eau s'enrichit en éléments lorsqu'elle a traversé les horizons holorganiques, et encore davantage après son passage dans l'horizon Ae (fig. 8 et 11). Ces horizons subissent donc une lixiviation importante de la plupart des éléments à l'exception de C organique qui marque une tendance à s'accumuler dans l'horizon Ae. Des quantités importantes d'éléments migrent donc vers les horizons B et vers l'eau de nappe; on note une augmentation particulière du fer, de l'aluminium et du silicium dans cette dernière (fig. 9b). En général, dans l'ordre décroissant d'importance, les proportions des éléments dans les percolats de L-F-H-Ah et Ae, et dans l'eau de nappe sont respectivement les suivantes: C, K, Ca, Si, Al, Fe et Mg, C, K, Si, Ca, Fe et Al, et C, K, Ca, Si, Fe, Mg et Al.

Au cours des mois de juillet et août, les horizons B ne sont plus submergés, ni alimentés en eau de gravité (fig. 6). Comme pour les sols mieux drainés, cette période est caractérisée par une accumulation d'éléments dans les horizons Ae (fig. 11). En général, dans l'ordre décroissant d'importance, les proportions des éléments en solution dans les percolats de L-F-H-Ah et de Ae, et dans l'eau de nappe sont respective-

ment les suivantes: C, K, Ca, Al, Si, Mg et Fe, C, K, Ca, Fe, Si, Fe et Al, C, Si, Ca, Mg, K, Fe et Al. On observe une légère baisse du pH des solutions.

Cette période relativement chaude et humide est caractérisée par une activité biologique intense dans les horizons holorganiques. Les horizons B podzoliques étant acides, exempts de racines et recevant peu de matériaux des horizons supérieurs, subissent probablement peu de transformation.

Période d'activité biologique faible

Sols bien drainés

Du début septembre au début novembre, date à laquelle les sols gèlent à nouveau, on note dans les sols de Sainte-Sophie, une plus grande quantité d'eau de gravité (fig. 6). Davantage d'éléments sont également retrouvés dans les solutions. Parmi ceux-ci, Si, Ca, K et Mg sont particulièrement abondants (fig. 7, 9a, 12 et 13). Des mécanismes de lixiviation dans la couche L-F-H-Ah et surtout dans l'horizon Ae agissent alors avec intensité (fig. 10). Ainsi, une partie des éléments qui s'était accumulée dans ce dernier horizon, éléments provenant de la couche L-F-H-Ah ou encore d'une altération des minéraux en place, est éliminée au cours de l'automne. En général, dans les percolats et l'eau de nappe des sols de Sainte-Sophie, on retrouve respectivement dans l'ordre décroissant d'importance C, Ca, K, Si, Mg, Al et Fe, et C, Ca, Si, K, Al et Fe. Dans les percolats de L-F-H-Ah des sols de Leeds, on retrouve dans l'ordre décroissant d'importance C, Ca, Mg, Si, Al, K et Fe, alors que dans l'eau de ruisseau située près de ces sols on retrouve C, Ca, Mg, Si, K, Al et Fe.

Sols mal drainés

Dans les sols mal drainés de Victoriaville, le toit de la nappe d'eau se rapproche sensiblement des horizons Ae dès la mi-septembre (fig. 2 et 5). Les éléments en solution issus des horizons holorganiques s'accumulent en partie dans les Ae (à l'exception du fer et du silicium), et en partie dans les B podzoliques et la nappe (fig. 11). En général, dans l'ordre décroissant d'importance, les éléments suivants sont retrouvés respectivement dans les percolats et l'eau de nappe: C, Ca, K, Al, Mg, Si et Fe, C, Ca, K, Si, Mg, Al et Fe, et C, Ca, Si, K, Mg, Al et Fe.

Au cours de cette période, les mécanismes podzoliques de migration-accumulation agissent donc surtout dans la partie supérieure du profil, à partir de l'horizon B podzolique supérieur, puisque la nappe est élevée, alors que des mécanismes de remise en solution par réduction s'effectuent dans la partie inférieure du profil.

DISCUSSION

Importance des mécanismes podzoliques de migration-accumulation

Dans les sols podzolisés de Victoriaville et de Tingwick, l'action des mécanismes podzoliques de migration-accumulation s'effectue au printemps et à l'automne. Les sols relativement bien drainés fonctionnent comme ceux étudiés par Védý et al. (1977): ils connaissent au printemps, juste après la fonte des neiges, et plus particulièrement à l'automne, des mécanismes de migration-accumulation d'éléments métalliques et de matière organique. Cependant, les expériences réalisées dans ce travail permettent d'apporter certaines précisions. Les éléments métalliques proviennent de la couche L-F-H-Ah et de l'horizon Ae s'il est présent, et migrent

en partie vers les horizons B podzoliques, et en partie vers la nappe phréatique. Au printemps dans les sols de Sainte-Sophie, une quantité assez importante de Fe et Si provient de l'horizon Ae, alors que les autres éléments proviennent principalement de la couche L-F-H-Ah (fig. 10). A l'automne, c'est seulement au cours des mois d'octobre et de novembre qu'une majorité d'éléments provient de l'horizon Ae.

Ainsi, dans les sols podzolisés, l'enrichissement des solutions en Fe et Al ne dépend pas nécessairement de la présence d'un horizon Ae, car des complexes et hydroxydes ferrugineux et alumineux peuvent se former dans la couche L-F-H-Ah.

La migration de la matière organique s'effectue comme celle de plusieurs éléments métalliques: au printemps, elle provient uniquement de la couche L-F-H-Ah et s'accumule à la fois dans l'horizon Ae s'il est présent, les horizons B podzoliques et l'eau de nappe (fig. 10); à l'automne elle provient surtout de l'horizon Ae si celui-ci est présent. Cet horizon est donc le siège de mécanismes de migration-accumulation (lessivage, lixiviation, chélation, illuviation etc.), mais l'intensité des mécanismes de migration prône sur celle des mécanismes d'accumulation.

Dans ces sols, la mobilité de C, Ca, K, Mg et Si est généralement supérieure à Al et Fe. Ces sols s'épuisent donc moins rapidement en Fe et Al qu'en Ca, K, Mg et Si. D'autre part, le fait que de faibles quantités seulement de Fe et Al soient retrouvées dans l'eau de nappe (fig. 9) ou de ruisseau (fig. 13), indique que ces éléments ont tendance à s'accumuler dans les horizons B podzoliques. De plus, le pH acide des solutions et la présence de complexes organo-métalliques (Duchaufour 1977) et d'hydroxydes amorphes à cristallisés de ces éléments (Farmer 1981), sont des facteurs qui limitent leur évacuation hors du profil.

Dans les sols podzolisés mal drainés, les mécanismes de migration tels que décrits dans l'étude des sols mieux drainés, ne sont observés qu'au cours de deux courtes périodes, soit au début de la feuillaison, ou encore à la chute des feuilles, vers la fin septembre, avant que la nappe ne remonte à nouveau (fig. 11).

La période printanière antérieure à la feuillaison, et celle automnale postérieure à la chute des feuilles, sont caractérisées par une nappe élevée, submergeant en partie ou totalement les B podzoliques. L'entraînement des matériaux podzoliques issus des horizons holorganiques et Ae s'effectue alors vers la nappe phréatique. Dans ces conditions d'hydromorphie, une précipitation des complexes organo-métalliques dans les horizons B peut se réaliser, notamment lorsque les solutions ont des concentrations suffisamment élevées en éléments métalliques et en matière organique, et également lorsque le potentiel d'oxydo-réduction de ces solutions est adéquat (Soil Survey Staff 1975, De Conninck 1981). Il est donc probable que les mécanismes de précipitation et de remise en solution des composés ferrugineux et alumineux se succèdent en fonction des concentrations des solutions et de leur pouvoir réducteur. D'autre part, comme les mécanismes de migration dans l'horizon Ae sont relativement intenses au cours de ces périodes, cet horizon est alors le siège d'un "weathering" important (Pagé 1977).

Au cours de l'été, l'ensemble des sols étudiés ici, présente un comportement semblable: la majorité des éléments en migration s'accumule dans l'horizon Ae (fig. 10 et 11). Le pH des solutions est alors à leur niveau le plus bas, probablement en raison de la plus forte concentration en CO₂ dégagée par les organismes vivants du sol. Il est donc permis de penser que l'horizon Ae subit alors un "weathering" par acidolyse et complexolyse

(Pédro 1979), puisque les minéraux sont en présence de solutions acides riches en matière organique; mais il est également permis de penser que c'est probablement au cours de cette période que se réalise un grand nombre de néoformations minérales telles les smectites, kaolinite et interstratifiés par siallisation (Pédro 1979), en raison de l'accumulation des éléments métalliques que l'on y observe.

Importance du cycle biogéochimique dans les sols podzolisés

D'après les travaux de nombreux auteurs (Dommergues et Mangenot 1970, Righi 1977, Callot et al. 1982, Pagé 1986), les horizons B podzoliques sont marqués au cours de la saison estivale par des mécanismes biologiques intenses, notamment par ceux occasionnés par les microorganismes, la pédofaune et les racines actives fort abondantes dans plusieurs de ces horizons. Ces mécanismes peuvent produire de profondes modifications minéralogiques (Dommergues et Mangenot 1970, Callot et al. 1982), entraînant la libération d'éléments métalliques. Dans la présente étude, le fait que l'on note des concentrations relativement élevées de C organique, Si, Ca, Mg, Al et Fe dans les percolats des horizons hologaniques, implique qu'une partie des éléments libérés dans les horizons B podzoliques est interceptée par les racines et amenée dans la tige et les feuilles de la plante; puis, lors de la chute des feuilles, ou encore lorsque la plante meurt, ces éléments s'accumulent dans la couche L-F-H-Ah (fig. 4). Sous forme ionique ou encore se complexant à la matière organique ou s'organisant en hydroxydes ou oxyhydroxydes dans ces derniers horizons, ils retournent en solution en ou suspension vers les horizons B podzoliques.

Ce cycle biogéochimique joue donc un rôle important dans l'édification des B podzoliques d'un grand nombre de sols podzolisés du Québec.

De plus, dans les sols caractérisés par l'absence de l'horizon Ae, comme dans un grand nombre des sols de Leeds, le cycle biogéochimique assure une présence permanente de Fe et Al dans les solutions percolantes, et permet le développement d'horizons B podzoliques riches en fer et aluminium libres (fig. 3).

Cependant, les sols mal drainés d'Hemming-Falls sont peu explorés par les racines, et le cycle biogéochimique ne s'effectue donc pas dans ces sols. Pourtant, on retrouve une grande abondance de cations métalliques dans les percolats de L-F-H-Ah. Mais il importe de tenir compte du fait que la litière et l'humus sont formés à partir d'espèces arborifères exploitant les sols mieux drainés avoisinants.

CONCLUSION

La podzolisation agit sur les sols du Québec au cours de deux périodes principales, le printemps et l'automne. Mais au cours de l'été, l'activité racinaire est telle, qu'une quantité importante de cations des horizons minéraux se retrouve dans les tiges et les feuilles des plantes. Un cycle biogéochimique s'établit donc dans ces sols, cycle qui rendra possible une accumulation importante de Fe et Al dans les horizons holorganiques, puis dans les horizons B podzoliques. Il est même possible de dire que dans de nombreux sols des Appalaches, comme ceux de Leeds par exemple, les horizons B podzoliques ne se formeraient pas sans une action racinaire permettant d'assurer le cycle biogéochimique.

Mais ce cycle biogéochimique se retrouve également dans un grand nombre de sols dont la pédogénèse diffère de celle des podzols (Duchaufour 1977), de telle sorte que le phénomène d'accumulation du fer et de l'aluminium dans les horizons B n'est pas exclusif à ces derniers. En effet, Fe et Al accumulés en surface, sont entraînés en profondeur grâce

aux solutions percolantes ou encore la pédofaune, à la fois sous forme de complexe, d'hydroxydes et d'oxydes (Dommergues et Manganot 1970). Il faut donc s'attendre à ce que certains horizons B brunisoliques et B luvisoliques puissent en contenir des quantités aussi élevées que dans les horizons B podzoliques. L'accumulation de Fe et Al complexés à la matière organique dans les horizons B n'étant pas un phénomène exclusif aux sols podzolisés, on ne peut lui attacher une trop grande importance pour caractériser ces sols.

BIBLIOGRAPHIE

- EVERY, B. W. 1980. Soil classification in England and Wales. Soil Survey Technical Monograph, no 14.
- BELOUSOVA, N. I. 1981. Lysimetric studies in the taïga zone genetical interpretations. Colloques internationaux du C.N.R.S., no 303, "Migrations organo-minéraux dans les sols tempérés". Nancy. p. 31-40.
- BROOKS, R. R. 1972. Geobotany et biogéochimie in mineral exploration. Harper and Row, London. 190 p.
- BRUCKERT, S. 1970. Influence des composés organiques solubles sur la pédogénèse en milieu acide. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy, Ann. Agron., 21(4):421-452 et (6):725-757.
- CALLOT, G., CHAMAYOY, H., MAERTENS, C., et SOLSOC, L. 1982. Les interactions sol-racine. INRA, Paris. 325 p.

- COMMISSION CANADIENNE DE PEDOLOGIE 1978. Le système canadien de classification des sols. Agriculture Canada, Ottawa, Ont. 170 p.
- COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS 1967. Classification des sols. INRA, Versailles. 96 p.
- DALY, B. K. 1982. Identification of podzols and podzolised soils in New Zealand by relative absorbance of oxalate extracts of A and B horizons. *Geoderma* 28:29-38.
- DE CONNINCK, F. 1981. Application des phénomènes de surface au processus de podzolisation. Colloques Internationaux du C.N.R.S., no 303, "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés", p. 259-268.
- DOMMERS, Y. et MANGENOT, F. 1970. Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson, Paris. 796 p.
- DUCHAUFOR, Ph. 1977. Pédogénèse et classification. vol. 1, éd. Masson, Paris, 477 p.
- DUFRESNE, A. et HENDERSHOT, W. H. 1985. Source d'aluminium dans les podzols. 53e Congrès de l'ACFAS. Chicoutimi. Vol. 5253, p. 318.
- FARMER, V. C. 1981. Possible roles of mobile hydroxyaluminum orthosilicate complexes (proto-imogolite) and other hydroxyaluminum and hydroxy-iron species in podzolization. Coll. Int. C.N.R.S., Nancy, p. 275-280.
- FEDOROFF, A. 1972. Hydrologie des sols. Document INRA, Science du sol. 159 p.
- FORTIN, A. J. 1972. Observations microbiologiques dans quelques sols forestiers du Québec. *Can. J. Microbiol.* 19:1379-1388.
- GOLDIN, A. 1983. Comparison of some podzols and spodosols in the Fraser Lowland, British Columbia and adjacent Washington State. *Can. J. Soil Sci.*, 63:579-591.

- GUILLET, B., ROUILLER, J. et VEDY, J. C. 1981. Dispersion et migration des minéraux argileux dans les podzols. Contribution des composés organiques associés, leur rôle sur les formes et l'état de l'aluminium. Colloques internationaux du C.N.R.S., no 303, "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés", p. 49-56.
- HIGASHI, T. DE CONNINCK, F. et GELANDE, F. 1981. Characterization of some spodic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma* 25:131-142.
- JUSTE, C. 1965. Contribution à la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique. Thèse, Nancy, 135 p.
- MCKEAGUE, J. A., WANG, C., COEN, G. M., DE KIMPE, C. R., LAVERDIERE, M. R., EVANS, L. J., KLOOSTERMAN, B. and GREEN, A. J. 1983. Testing chemical criteria for spodic horizons on podzolic soils in Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1052-1054.
- MOKMA, D. L. 1983. New chemical criteria for defining the spodic horizon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:972-976.
- NYS, C., PATERNOSTER, M. et VEDY, J. C. 1981. Transfert et redistribution des éléments en solution par les eaux de gravité de deux écosystèmes feuillu et résineux sur schistes du revinien. Colloques internationaux du C.N.R.S., no 303: "Migrations organo-minérales dans les sols tempérés". p. 31-40.
- PAGE, F. 1977. Etude minéralogique, physique, chimique et micromorphologique de deux sols podzoliques du Québec à horizons indurés en profondeur. Thèse, Univ. Laval, Québec. 217 p.

- PAGE, F. 1983. Formation des horizons B podzoliques: importance du cycle biogéochimique. Rapport d'activité 1982-83. Service de recherche en sols, MAPAQ, Québec. 113 p.
- PAGE, F. 1986. Rôle des racines sur la différenciation des organisations micromorphologiques des horizons B podzoliques du Québec. Dans "micromorphologie des sols", Réunion internationale de micromorphologie des sols, éd. Fédoroff, N., Bresson, L.-M. et Courty, M.-A. Paris. Sous presse.
- PEDRO, G. 1979. Les conditions de formations des constituants secondaires. Dans "Pédologie, 2. Constituants et propriétés du sol". Ed. Duchaufour, Ph. et Souchier B., Masson, Paris, p. 58-72.
- RICHI, D. 1977. Génèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse. Université de Poitiers, Poitiers, 144 p.
- ROBERT, M., RAZZAGHE, M. R., VICENTE, M. A. et VENEAU, G. 1979. Rôle du facteur biochimique dans l'altération des minéraux silicates. Science du sol, no 2-3:153-174.
- SERVICE DE LA METEOROLOGIE 1982. Statistiques annuelles et mensuelles. Ministère de l'Environnement. Québec.
- SOIL SURVEY STAFF 1975. Soil taxonomy. U.S. Dept. Agric. Handb. no 436, U.S. Government Printing Office, Washington D. C., 754 p.
- TURENNE, J. F. 1975. Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyannaises. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy. 175 p.
- VEDY, J. C. et BRUCKERT, S. 1979. Les solutions du sol. Composition et signification pédogénétique. Dans "Pédologie 2. Constituants et

propriétés du sol. Ed. Bonneau M. et Souchier B. Masson. Paris
457 p.

VEDY, J. C., LE TACON, F. et BRUCKERT, S. 1977. Formes de transfert des
éléments métalliques par les solutions du sol dans deux écosystèmes
forestiers sur grès triasique de l'est de la France. Dans "Soils
as a site factor for forest of temperate and cool zones". Pro-
ceedings Intern. Soc. Soil Sci. Working Group on Forest Soils.
Zvolen Czechoslovakia. p. 243-257.

CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE ET CHIMIQUE DES PODZOLS.

C.R. De Kimpel¹

RÉSUMÉ

Les systèmes de classification des sols reposent sur les théories généralement acceptées pour la genèse des sols et, en ce sens, ils reflètent les connaissances acquises. Ils évoluent donc au cours du temps pour intégrer de nouveaux concepts. Un bon exemple est celui de la genèse des sols podzolisés dans lesquels la migration des complexes organominéraux semblait être le facteur essentiel. Actuellement cependant, la migration de complexes purement minéraux a été bien établie et elle ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Dans ce contexte, l'évolution des formes amorphes, cristallines et complexes du fer et de l'aluminium doit être à nouveau précisée.

INTRODUCTION

Les systèmes de classification des sols reflètent, au moment où ils sont proposés, les hypothèses les plus largement acceptées sur la formation et l'évolution des sols. Ils rendent compte aussi des grandes orientations prises par les travaux pédologiques au cours des années. Un certain nombre de nuances existant entre ces diverses classifications, il est intéressant à titre d'exemple, de situer brièvement les podzols dans quelques-unes d'entre elles.

Dans le système français (Commission de Pédologie et de Cartographie des sols 1967), les sols podzoliques sont caractérisés par une altération biochimique des silicates sous l'influence de la matière organique soluble et acide, avec formation de complexes organo-minéraux plus ou moins mobiles s'accumulant en un ou deux horizons riches en matériaux amorphes, de type spodique, soit le Bh foncé riche en acides humiques et le Bs riche en hydroxydes (Duchaufour 1976). L'évolution de ces sols est conditionnée par trois facteurs écologiques: le climat, la nature acide du matériau et

¹ Agriculture Canada, Centre de Recherches sur les Terres, Ferme expérimentale Centrale, Ottawa, Ontario, K1A 0C6.

les conditions de drainage. Dans ce système, les podzols sont climatiques sous climat boréal tandis que, sous climat atlantique, deux types d'évolution permettent d'expliquer le passage des sols brunifiés aux sols podzolisés: a) la podzolisation directe résultant de l'action des acides organiques sur les silicates et b) la podzolisation indirecte, précédée d'une phase d'éluviation de l'argile et du fer, avec acidification du profil et modification de la matière organique.

Dans le système américain (Soil Conservation Service 1975), l'horizon spodique est caractérisé par la précipitation de matériaux amorphes actifs composés de matière organique et d'aluminium, avec ou sans fer. Le terme "actif" implique une capacité d'échange cationique, une surface spécifique et une rétention d'eau élevées. Cet horizon se forme sous climat froid, dans des sols de texture grossière, sous éricacées ou sous forêt. La réaction du sol est acide. Enfin, les associations de matière organique avec du fer et de l'aluminium, sous formes de chélates ou par liens électrostatiques sont un des critères de classification.

Dans le système canadien (Commission Canadienne de Pédologie 1978), les sols de l'ordre podzologique contiennent un horizon B caractéristique identifié à la fois par des critères morphologiques et chimiques. Il y a accumulation de produits amorphes dans l'horizon B podzologique, qui se forme dans des sols de texture grossière à moyenne, sous végétation de bruyère ou de forêt, en climat frais à froid, humide à perhumide. La nature des matériaux parentaux a justifié des critères un peu moins rigoureux que dans le système américain.

Ce bref aperçu de la position des sols podzologiques dans les systèmes de classification fait ressortir les idées retenues pour leur formation. Et c'est de fait cette interaction entre matière organique et minéraux qui a aussi fortement retenu l'attention des chercheurs.

Il était reconnu depuis longtemps que sous les conditions climatiques prévalant au Canada, les sols podzologiques devraient être les plus modifiés tant au point de vue de l'altération des minéraux que de celui des transformations chimiques. Ces deux aspects seront successivement évoqués ci-

dessous.

Minéralogie des sols podzoliques

Une large partie des connaissances sur la minéralogie des sols podzoliques au Canada a été rassemblée et résumée par Kodama (1979) à partir des résultats de recherche publiés sur 55 profils jusqu'en 1977. Cette revue contenait deux volets. Le premier concernait la présence de minéraux argileux, primaires ou hérités, dans les matériaux parentaux des sols. En effet, lors des glaciations quaternaires, il y a eu un profond remaniement des dépôts superficiels. Les gisements de matériaux saprolitiques ne sont pas très fréquents et, souvent d'ailleurs, recouverts par des dépôts glaciaires (LaSalle et al 1985). Lors du passage des glaciers, des minéraux secondaires d'altération ont été repris et mêlés aux autres formations. Ceci explique que, quelle que soit la région considérée, le Bouclier, les Basses-Terres ou les Appalaches, on identifie généralement les mêmes types de phyllosilicates dans les matériaux parentaux: des micas, des vermiculites, des chlorites, des kaolins et des minéraux interstratifiés. Il existe bien sûr des différences de région à région, mais ce sujet ne sera pas envisagé ici car il a été traité antérieurement (De Kimpe et Martel 1986).

Dans le deuxième volet de sa revue, Kodama (1979) a divisé en trois catégories les séquences observées dans les transformations minéralogiques des podzols:

- (1) la chlorite a entièrement ou presque entièrement disparu de l'horizon minéral supérieur et il y a une augmentation du contenu en minéraux gonflants.
- (2) comme en (1) ci-dessus, mais il y a persistance de quantités assez élevées de chlorites héritées.
- (3) présence de smectites et vermiculites chloritisées dans les horizons minéraux superficiels.

La différence entre les catégories (1) et (2) traduit essentiellement le degré d'évolution des profils, alors que (3) reflète des changements dans les processus de podzolisation. Selon les résultats rapportés au Tableau 1, adapté de Kodama (1979) et complété par la compilation de résultats plus récents, les podzols de la première catégorie ont été observés dans

Tableau 1. Évolution minéralogique dans les Podzols du Québec

<u>Type de transformation</u>	<u>Région physiographique</u>		
	<u>Bouclier</u>	<u>Basses-terres</u>	<u>Appalaches</u>
1) sans chlorite	†	†	X
2) avec chlorite		X	
3) minéraux chloritisés	(†)	(†)	

X: d'après Kodama

†: analyses postérieures à 1977

les trois régions physiographiques du Québec, et ceux de la deuxième catégorie dans les Basses-Terres; quant aux podzols de la troisième catégorie, on peut mentionner des sols avec des smectites assez fortement chloritiques dans le Bouclier et les Basses-Terres. Le traitement de la fraction argile par le citrate de Na à 100°C (Tamura 1958) permet d'extraire des quantités parfois abondantes d'hydroxypolymères d'Al intercalés entre les feuillets des minéraux gonflants (Mutwewingabo et al 1975, De Kimpe 1976). Il serait cependant nécessaire d'avoir plus de comparaisons entre ces sols au Québec et dans l'Ouest Canadien pour affirmer leur complète similitude.

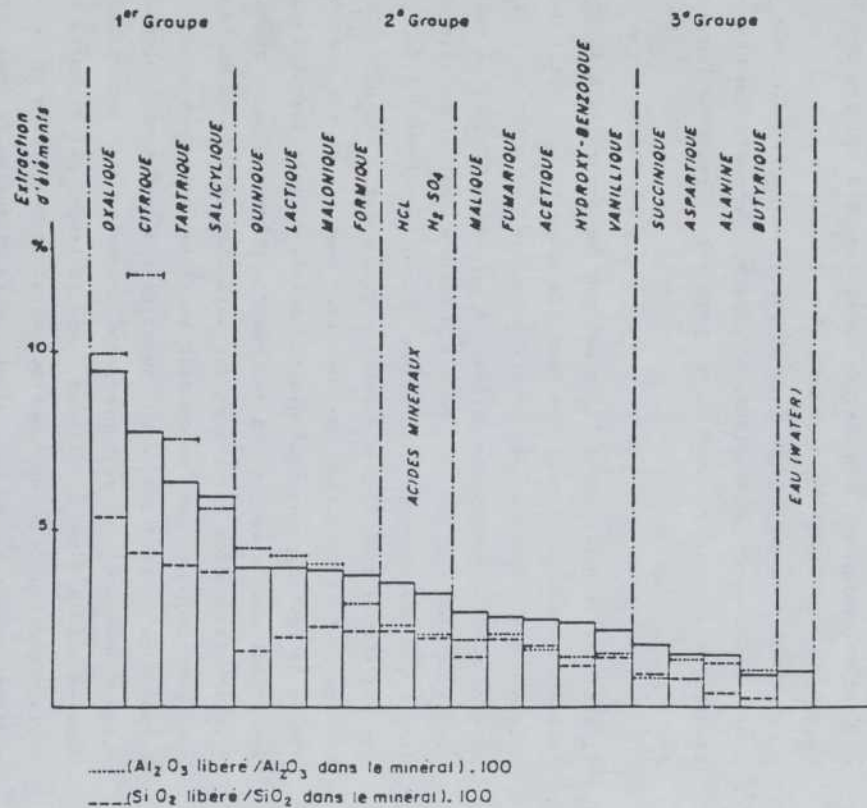
Parmi les travaux publiés depuis 1977, deux contiennent des informations complémentaires sur la présence de kaolinite dans les podzols (Laverdière et al 1981, Evans 1982). Ce phyllosilicate est généralement considéré comme un minéral argileux résiduel, datant des altérations inter- ou préglaciaires, et incorporé au till par les glaciers (LaSalle et al 1985, De Kimpe et Martel 1986). Dans les études de Laverdière et al (1981) et celles de Evans (1982), portant sur environ 25 profils de podzols, la kaolinite a été clairement identifiée par diffraction des rayons X et spectrographie infrarouge dans les horizons Ae et Ahe, alors qu'elle n'était pas signalée dans les horizons inférieurs. Il serait donc possible qu'il y ait formation de kaolinite dans les horizons éluviaux, ce qui ne serait pas en contradiction avec la théorie des migrations minérales dont il sera question plus loin. Cette question mériterait d'être reconsidérée dans le futur.

À l'appui des analyses minéralogiques réalisées sur les profils, et pour mieux interpréter les mécanismes de transformation des minéraux, de nombreux travaux ont été effectués sur leur altération par les acides organiques. Ceci était essentiel pour comprendre les mécanismes de dissolution et de complexation du fer et de l'aluminium impliqués dans le transfert et l'accumulation vers l'horizon B podzolique selon la théorie des migrations organominérales. Il serait certes fastidieux de faire une revue de tous ces travaux. Certains portent sur la caractérisation des acides présents dans l'humus (Schnitzer et Khan 1972, Ghosh et Schnitzer 1980, Lowe et Kudama 1984, Visser 1985) alors que d'autres portent plutôt sur la réaction entre les acides organiques et les minéraux, tant primaires que secondaires (Huang et Keller 1970, Schnitzer et Kodama 1977, Robert et al

1980, Kodama et al 1983). Razzaghe (1976) a défini trois groupes d'acides: un groupe d'acides complexants, un groupe d'acides peu complexants, dont l'action serait comparable à celle d'acides minéraux et enfin des composés peu acides dont l'action se rapproche de celle de l'eau (Fig. 1). À partir de ces travaux, il est plus facile de comprendre le rôle des acides organiques sur la dissolution et la transformation des minéraux dans les profils (Fedoroff et al 1977, Protz et al 1984).

Toutefois, la théorie des migrations organominérales pour la formation des Podzols n'était pas entièrement satisfaisante, principalement dans le cas des profils contenant des horizons Bs riches en allophanes. De tels profils ont été décrits en Écosse et c'est sous l'influence de Farmer et de ses collaborateurs qu'a été développée, vers le début des années 1980, la théorie de la migration des aluminosilicates hydratés dans les podzols (Anderson et al 1982, Farmer 1982). Depuis longtemps on avait identifié l'imogolite, un aluminosilicate fibreux, dans les produits d'altération des matériaux pyroclastiques des sols dérivés de cendrées volcaniques (Yoshinaga et Aomine 1962, Besoain 1968). Son identification par diffraction des rayons X et diffraction électronique (Russell et al 1969, Wada et Yoshinaga 1969) et par spectrographie infrarouge (Farmer et al 1977) a permis de développer cette nouvelle théorie de la formation des podzols. Brydon et Shimoda (1972) avaient déjà identifié un produit de type allophane dans un podzol de Nouvelle-Écosse. Mais c'est après que l'imogolite eut été nettement identifiée dans des podzols d'Écosse (Tait et al 1978), qu'il a été proposé que l'aluminium et le fer étaient susceptibles de migrer dans les profils sans être associés à la matière organique. Farmer et Fraser (1982) ont étudié la stabilité des sols colloïdaux dans le système $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2-H_2O$. En milieu acide de $pH < 5$, un produit colloïdal peu organisé apparaît dans le système $Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. Il s'agit de la proto-imogolite, qui se transforme, après chauffage, en imogolite tubulaire. Les mêmes auteurs ont considéré la possibilité de substituer Fe à Al, et ils ont montré que des sols d'hydroxydes mixtes de Al et Fe, avec ou sans silice, pouvaient expliquer le transfert des sesquioxydes dans les podzols, ainsi que la constance du rapport Al:Fe aux environs de 1,5 - 2,0 dans les extraits à l'oxalate. Leurs résultats indiquent aussi que la mobilité des sols d'Al et donc l'intensité de ce mode de podzolisation

Figure 1. Dissolution de la phlogopite par divers acides: 1^{er} groupe: acides complexants; 2^e groupe: acides peu complexants; 3^e groupe: composés peu acides (d'après Razzaghe 1976).



diminue dans les sols contenant beaucoup de minéraux altérables ayant des rapports Fe:Al élevés.

Depuis la publication de ces travaux, la présence d'imogolite a été mentionnée dans diverses régions du Canada, y compris le Québec. Ross et Kodama (1979) l'ont observée dans deux podzols ferro-humiques de Colombie-Britannique développés sur des matériaux contenant cependant un peu de cendres volcaniques. Elle existe aussi dans des podzols dépourvus de cendrées (Ross 1980, McKeague et Kodama 1981). Dans l'Est du Canada, elle a été trouvée au Québec (Wang et al 1986), ainsi que dans des brunisols de l'Ontario (Wang et Kodama 1986). Ce dernier exemple démontre encore le rapprochement que l'on peut faire entre les ordres podzolique et brunisologique.

Il est très probable que si l'on utilise les appareils adéquats pour la caractérisation de l'imogolite dans les sols, et tout particulièrement le microscope électronique, un nombre beaucoup plus grand de profils contenant ce minéral seront identifiés. À l'heure actuelle, il est encore difficile de préciser les limites à l'intérieur desquelles elle est stable dans les sols. D'autre part, comme le souligne Farmer (1982), la théorie des migrations minérales n'élimine pas la théorie des migrations organominérales pour la formation des podzols. Pour cet auteur, les acides organiques de faible poids moléculaire (oxalique, tartrique ...) libérés par les organismes du sol et les racines des plantes, jouent probablement un rôle important dans la mise en disponibilité de l'Al et du Fe contenus dans les minéraux, mais on connaît moins la durée de vie des complexes formés dans la solution du sol avant leur dégradation biologique. Farmer suggère aussi que les deux processus proposés pour la podzolisation peuvent se suivre à peu de distance dans le temps; par exemple, la formation et la migration de proto-imogolite seraient accentuées en période de forte activité biologique en été, alors que la migration des colloïdes organominéraux se ferait principalement sous des conditions de forte pluviosité.

Chimie des sols podzoliques

L'acidité du solum, une capacité d'échange dépendante du pH et une forte désaturation du complexe absorbant, principalement dans les horizons B

podzoliques, sont des caractéristiques chimiques suffisamment décrites pour qu'il soit nécessaire d'y revenir ici. Il est plus intéressant de souligner quelques aspects de la chimie du fer et surtout de l'aluminium, en relation avec les deux processus de podzolisation évoqués ci-dessus.

L'imogolite est généralement identifiée dans les horizons B inférieurs ou encore dans les horizons de transition BC des podzols. À ce niveau des profils, le contenu en C organique est plus faible et le pH un peu plus élevé que dans les horizons B supérieurs. Or, dans leur étude sur la stabilité des sols colloïdaux, Farmer et Fraser (1982) ont rapporté que l'aluminosilicate hydraté peu organisé ou proto-imogolite apparaissait à $\text{pH} < 5$, tandis que l'imogolite devenait stable à partir de cette valeur et au-dessus d'elle. Or la valeur de 5 correspond au pH de précipitation de $\text{Al}(\text{OH})_3$ à partir d'une solution de Al^{3+} ou de polycations hydratés d'aluminium. La forme désorganisée de la proto-imogolite serait apte au transport de l'aluminium puis, une fois atteint le pH 5 en profondeur, et peut-être en présence de silice en solution, il y aurait stabilisation de la forme bien organisée de l'imogolite.

L'étude des formes libres et complexes de l'aluminium dans la solution du sol (Hendershot et al 1984, Pagé 1986) contribuera à éclaircir cette question. Il faut encore noter que dans les podzols, le type de végétation a un effet sur la mobilité relative et la redistribution du fer et de l'aluminium dans les horizons B (De Kimpe et Martel 1976). Ainsi, sous végétation de conifères, le fer est plus fortement retenu dans les horizons B supérieurs alors que l'aluminium se retrouve plus profondément. Une telle situation est favorable à la formation de l'imogolite puisque dans ces conditions, un rapport $\text{Al}:\text{Fe} = 1,5-2,0$ est plus facilement atteint (Farmer et Fraser 1982).

Les auteurs qui ont étudié l'imogolite s'entendent pour souligner que la formation de complexes suivant la dissolution de l'aluminium des réseaux par les acides organiques empêche la formation de la proto-imogolite dans les horizons supérieurs des profils. Parfitt et Saigusa (1985) ont comparé les allophanes et les complexes humus-Al dans des spodosols et des andepts de Nouvelle-Zélande, développés sur les mêmes cendrées volcani-

ques. Ayant observé la présence d'opale formée par sursaturation de l'eau du sol en silice et l'absence d'imogolite dans les horizons supérieurs des Spodosols, ils ont conclu que l'aluminium, suite à sa complexation par les acides organiques, était sans doute le facteur limitant pour la formation de la proto-imogolite. D'autre part, la fraction argileuse de ces mêmes horizons contenait un kaolin et des minéraux 2:1 gonflants. Linares et Huertas (1971) ont démontré que la kaolinite pouvait se former, en milieu acide, par réaction entre la silice et un complexe organométallique d'aluminium qui assure le nombre de coordination VI à cet ion. Ainsi, la cristallisation d'un aluminosilicate pourrait prévenir la migration de l'aluminium vers les horizons inférieurs des profils. Il est tentant d'appliquer cette hypothèse à la présence de kaolinite rapportée par Laverdière et al (1981) et Evans (1982) dans les horizons supérieurs de 25 profils de podzols au Québec et en Ontario.

La différenciation des formes amorphes libres et complexées de l'aluminium, obtenue par analyse des extraits oxalate et pyrophosphate permet de présumer la présence d'imogolite. Cette relation a été signalée par plusieurs auteurs (Shoji et al 1982, Wang et Kodama 1986, Wang et al 1986) qui ont également vérifié la présence de l'imogolite par microscopie électronique. Les rapports $(Al_o-Al_p)/Al_p$ et $(Fe_o-Fe_p)/Fe_p$ seraient un bon reflet de la forme sous laquelle les sesquioxydes ont migré dans le profil. Depuis l'adoption de nouveaux critères de classification pour l'horizon B podzologique (Commission Canadienne de Pédologie 1978), l'analyse des extraits à l'oxalate n'est plus effectuée de façon routinière. Pourtant, elle offre des possibilités qui seront illustrées par un exemple (Pagé, communication personnelle 1986). Onze profils de podzols développés sur matériaux grossiers ont été échantillonnés dans une tranchée de 30 m de long dans la région de Victoriaville. Les profils formant une toposéquence appartiennent aux séries des Crêtes, Sorel, Saint-Jude. Le niveau de référence pour déterminer la position des profils est celui de la nappe au printemps, période où les phénomènes de transport sont les plus actifs. Quelques propriétés chimiques des horizons B sont présentées au Tableau 2. Les contenus en C organique et dans les diverses formes de Fe et d'Al, soit le DCB, l'oxalate et le pyrophosphate, ont permis d'établir des tendances pour l'accumulation des sesquioxydes dans les horizons

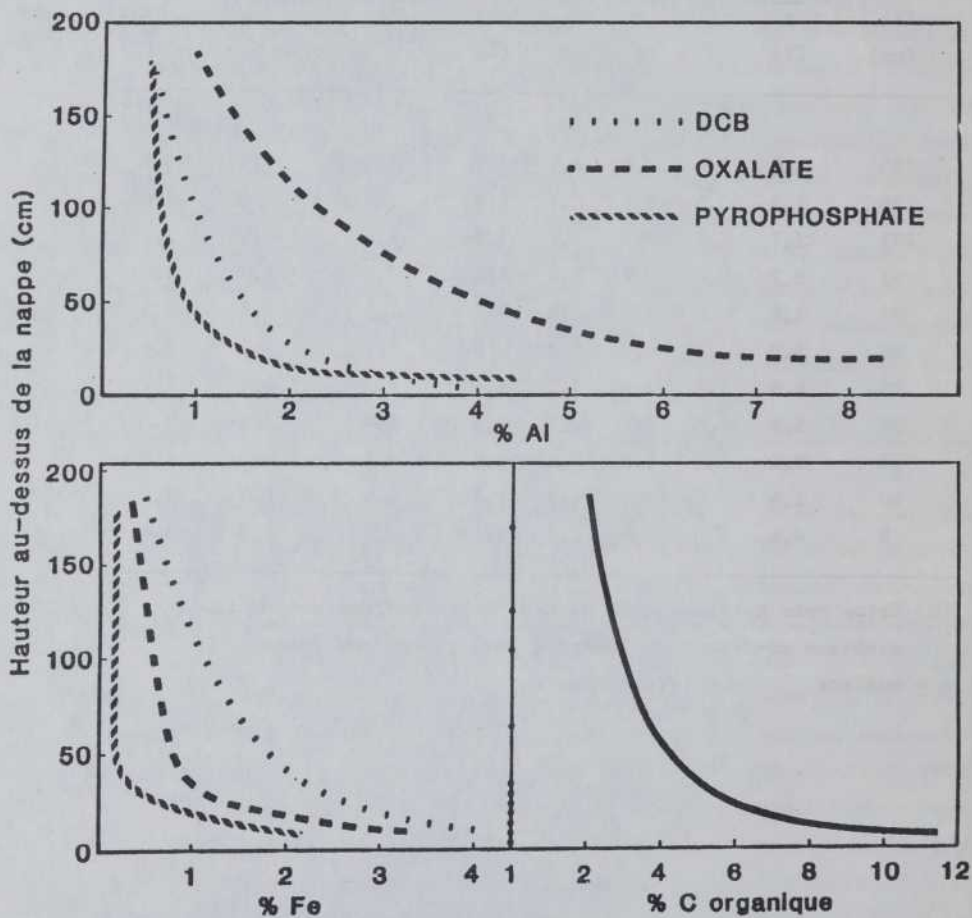
Tableau 2. Caractéristiques chimiques des horizons B de 11 profils
(Pagé 1986)

Cote du profil (1) (cm)	Al		Fe		C org (%)	$\frac{Al_o-Al_p}{Al_p}$	$\frac{Fe_o-Fe_p}{Fe_p}$	Al:Fe (oxal)
	o (%)	p (%)	o (%)	p (%)				
170	1,4	0,6	0,4	0,1	2,7	1,3	3,0	3,5
125	1,3	0,5	0,5	0,1	1,9	1,6	4,0	2,6
105	2,7	0,7	0,7	0,2	3,0	2,9	2,5	3,9
65	3,7	0,8	0,8	0,2	4,1	3,6	3,0	4,6
35	2,8	0,8	0,8	0,3	3,2	2,5	1,7	3,5
30	5,0	1,3	0,9	0,2	4,8	2,8	3,5	5,6
25	8,8	1,6	2,4	0,5	5,7	4,5	3,8	3,7
20	5,6	1,8	1,7	0,8	7,3	2,1	1,1	3,3
15	5,2	3,4	2,8	1,8	6,8	0,5	0,6	1,9
10	2,9	2,5	2,9	1,9	11,3	0,2	0,5	1,0
5	4,4	4,0	2,8	2,1	11,1	0,1	0,3	1,6

(1) Cette cote représente la hauteur de la surface des horizons minéraux au-dessus de la nappe phréatique de printemps.

o = oxalate p = pyrophosphate

Figure 2. Distribution moyenne des diverses formes de Al et Fe, ainsi que du carbone organique, dans les horizons B de 11 profils de Podzols (Pagé 1986). Les points indiquent la position des profils par rapport à la nappe.



B en fonction de la hauteur des profils au-dessus de la nappe (Fig. 2). Il y a accroissement des contenus en C organique, en Fe et Al totaux (DCB) et en Al amorphe (oxalate) quand la nappe phréatique se rapproche de la surface du sol. D'autre part, les formes complexées à la matière organique (pyrophosphate) se comportent très différemment. Il n'y a pas de grande différence dans le contenu en Fe_p et Al_p accumulés dans les horizons B des profils situés à plus de 30 cm au-dessus de la nappe. Par contre, dans les profils influencés par la frange capillaire, entre 30 et 0 cm, le contenu en Fe_p et Al_p augmente rapidement avec le contenu en C organique. Quelques examens préliminaires au microscope électronique indiqueraient la présence d'imogolite dans les profils élevés par rapport à la nappe. La distribution des formes de sesquioxydes s'explique selon le schéma proposé par Farmer (1982). Dans les profils aérés, il y a décomposition des complexes humus-Al et formation d'imogolite, tandis que dans les profils humides, ces complexes sont plus stables.

Le dernier aspect qui sera abordé est celui du mouvement et de l'accumulation du fer dans divers sols podzoliques. Plusieurs auteurs (Wall 1969, Laflamme et al 1973, Belisle et Moore 1981, Protz 1982, Protz et al 1984, De Kimpe et al 1985) qui ont étudié la formation des Podzols sur matériaux calcaires, ont noté que la podzolisation s'installe rapidement après la décarbonatation du solum. La limite entre le front de podzolisation et les horizons calcaires est parfois très mince (Laflamme et al 1973). Protz et al (1984) ont évalué la vitesse de progression de la décarbonatation dans une série de profils situés près de la Baie d'Hudson et dont l'âge varie de 100 à 5000 ans. Sous une pluviosité d'environ 50 cm et une température moyenne de $-5^{\circ}C$, la vitesse de lessivage correspond à:

$$\text{profondeur de lessivage (cm)} = -0,904 + 0,0058 \times \text{temps en années.}$$

Ceci correspond à environ 10 cm en 2000 ans pour un matériau contenant de 45 à 75% de carbonates avec un rapport calcite:dolomite moyen de $4,2 \pm 1,2$. De plus, sous les conditions climatiques indiquées, un podzol avec des horizons Al, Bh et Bf bien définis serait formé en moins de 2500 ans. Sous couvert de mousses et d'épinettes noires, il y a donc production d'acides organiques en quantités suffisantes pour altérer les minéraux et en libérer les sesquioxydes. Cependant les horizons podzoliques n'ont pas nécessairement l'épaisseur suffisante pour être classifiés comme tels

(Protz et al 1984). Schnitzer et Kodama (1977) ont montré que l'effet de complexation par les acides organiques est particulièrement important vis-à-vis du fer. Cependant les complexes organiques mobiles sont immobilisés lorsque le milieu contient beaucoup d'ions Ca^{2+} (Protz et al 1984). Ces observations permettent donc d'expliquer les concentrations importantes de Fe dans certains horizons qui justifient alors la classification de ces derniers parmi les horizons podzoliques. Ainsi le contenu de quelques horizons B de sols formés sur schistes calcaires contenaient plus de 5% de Fe_{DCB} , et il a suffi que moins de 20% de cette quantité soit sous forme de complexes (Fe_{pyro}) pour que soient rencontrés les critères de l'horizon podzolique (De Kimpe et al 1985).

Ce phénomène est encore plus évident dans le cas des sols formés sur roches "basiques", c'est-à-dire pauvres en silice mais riches en minéraux ferro-magnésiens. Dans ce cas, le contenu en Fe_2O_3 total atteint et même dépasse 10%. Le pourcentage d'argile produite est souvent faible. Ici encore, comme l'action des acides organiques sur les minéraux ferro-magnésiens est fort intense (Schnitzer et Kodama 1977), il y a formation d'horizons qui rencontrent beaucoup de critères de l'horizon B podzolique. L'impossibilité de situer adéquatement dans le système canadien des sols qui seraient classés ailleurs comme andosols (Soil Conservation Service 1975), impose leur insertion dans l'ordre podzolique (De Kimpe et Dejou 1986).

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, H.A., Berrow, M.L., Farmer, V.C., Hepburn, A., Russel, J.D. and Walker, A.D. 1982. A reassessment of podzol formation processes. *J. Soil Sci* 33: 125-136.
- Belisle, J. and Moore, T.R. 1981. Characteristics of podzolised soils formed in carbonate-bearing tills in the Schefferville area. McGill University sub-arctic Research LPapers n° 32: 85-95.
- Besoain, E. 1968. Imogolite in volcanic soils of Chile. *Geoderma* 2: 151-169.
- Brydon, J.E. and Shimoda, S. 1972. Allophanes and other amorphous constituents in a podzol from Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 52: 465-475.
- Commission Canadienne de Pédologie. 1978. Le système Canadien de classification des sols. *Agric. Can.*, Publ. 1646, 170 p.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. 1967. Classification des sols. *École Nat. Sup. Agron. Grignon, Paris*, 87 pp.
- De Kimpe, C.R. 1976. Influence of parent material and moisture regime on soil genesis in the Appalachian Highlands, Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 56: 271-283.
- De Kimpe, C.R. et Dejou, J. 1986. Classification of soils developed on basic parent materials in the Canadian and French systems of soil classification. *Can. J. Soil Sci.* 66: 177-181.
- De Kimpe, C.R., Laverdière, M.R., Laflamme, G. et Rompré, M. 1985. Formation et évolution des sols sur matériaux calcaires dans le piémont Appalachienn, Québec. *Géogr. Phys. et Quaternaire* 39: 299-306.
- De Kimpe, C.R. and Martel, Y.A. 1976. Effects of vegetation on the distribution of carbon, iron and aluminum in the B horizons of Northern Appalachian Spodosols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 40: 77-80.

- De Kimpe, C.R. et Martel, Y.A. 1986. Rétrospective des recherches sur la genèse et la classification des sols au Québec, pp. 88-114 dans "Rétrospective de la recherche sur les sols au Québec". Cahiers de l'ACFAS N° 37, Montréal.
- Duchaufour, P. 1976. Atlas Écologique des sols du Monde. Masson, Paris, 178 p.
- Evans, L.J. 1982. Characteristics of some loamy-textured podzols in northeastern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 62: 281-290.
- Farmer, V.C. 1982. Significance of the presence of allophane and imogolite in podzol Bs horizons for podzolisation mechanisms: a review. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28: 571-578.
- Farmer, V.C. and Fraser, A.R. 1982. Chemical and colloidal stability of soils in the Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SiO_2 - H_2O system: their role in podzolisation. *J. Soil Sci.* 33: 737-742.
- Farmer, V.C., Fraser, A.R., Russell, J.D. and Yoshinaga, N. 1977. Recognition of imogolite structure in allophanic clays by infrared spectroscopy. *Clay Miner.* 12: 55-57.
- Fédoroff, N., De Kimpe, C.R. et Bourbeau, G. 1977. L'altération des minéraux primaires en milieu podzolique en France atlantique et au Québec. *Catena* 4: 29-40.
- Ghosh, K. and Schnitzer, M. 1980. Macromolecular structures of humic substances. *Soil Sci.* 129: 266-276.
- Hendershot, W.H., Lalande, H. and Dufresne, A. 1984. Aluminum speciation and movement in three small watersheds in the southern Laurentians. *Water Poll. Res. J. Canada*: 19: 11-26.
- Huang, W.H. and Keller, W.D. 1970. Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids. *Am. Mineral.* 55: 2076-2094.

- Kodama, H. 1979. Clay minerals in Canadian soils: their origin, distribution and alteration. *Can. J. Soil Sci.* 59: 37-58.
- Kodama, H., Schnitzer, M. and Jaakkimainen. 1983. Chlorite and biotite weathering by fulvic acid solutions in closed and open systems. *Can. J. Soil Sci.* 63: 619-629.
- Laflamme, G., Baril, R. et De Kimpe, C.R. 1973. Caractérisation d'un podzol humo-ferrique, luvisolique et lithique à Esprit-Saint, comté de Rimouski, Québec. *Can. J. Soil Sci.* 53: 145-154.
- LaSalle, P., De Kimpe, C.R. and Laverdière, M.R. 1985. Sub-till saprolites in southeastern Quebec and adjacent New England: erosional, stratigraphic, and climatic significance. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 197: 13-20.
- Laverdière, M.R., De Kimpe, C.R. et d'Avignon, A. 1981. Caractéristiques minéralogiques et chimiques de quelques sols sableux du Québec en regard de leur évolution pédologique. *Can. J. Soil Sci.* 61: 273-283.
- Linares, J. and Huertas, F. 1971. Kaolinite: synthesis at room temperature. *Science* 171: 896-897.
- Lowe, L.E. and Kudama, K. 1984. A comparison of two methods for routine characterization of humus in pedological studies. *Soil Sci. Plant Nutr.* 30: 321-331.
- McKeague, J.A. and Kodama, H. 1981. Imogolite in cemented horizons of some British Columbia soils. *Geoderma* 25: 189-197.
- Mutwewingabo, B., De Kimpe, C.R., Bourbeau, G.A., Baril, R.W. et Lajoie, P. 1975. Étude comparative de sols des Laurentides, Québec. *Can. J. Soil Sci.* 55: 363-379.
- Pagé, F. 1986. Apport des techniques micromorphologiques et géochimiques à la connaissance des Podzols boreaux du Québec. Thèse, Univ. Pierre

et Marie Curie, Paris VI, France (en préparation).

- Parfitt, R.L. and Saigusa, M. 1985. Allophane and humus-aluminum in Spodosols and Andepts formed from the same volcanic ash beds in New Zealand. *Soil Sci.* 139: 149-155.
- Protz, R. 1982. Development of podzolic soils in the Hudson and James Bay lowlands, Ontario. *Natur. Can.* 109: 501-510.
- Protz, R., Ross, G.J., Martini, I.P. and Terasmae, J. 1984. Rate of podzolic soil formation near Hudson Bay, Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 64: 31-49.
- Razzaghe, K.M. 1976. Contribution à l'étude expérimentale des phénomènes d'altération en milieu organique acide. Thèse, Univ. Paris VI, 222 p.
- Robert, M., Veneau, G. et Berrier, J. 1980. Solubilisation comparée des silicates, carbonates et hydroxydes en fonction des conditions du milieu. *Bull. Minéral.* 103: 324-329.
- Ross, G.J. 1980. Mineralogical, physical, and chemical characteristics of amorphous constituents in some podzolic soils from British Columbia. *Can. J. Soil Sci.* 60: 31-43.
- Ross, G.J. and Kodama, H. 1979. Evidence for imogolite in Canadian soils. *Clays Clay Miner.* 23: 297-300.
- Russell, J.D., McHardy, W.J. and Fraser, A.R. 1969. Imogolite: a unique aluminosilicate. *Clay Miner.* 8: 87-99.
- Schnitzer, M. and Khan, S.U. 1972. Humic substances in the environment. Marcel Dekker, New-York. 327 p.
- Schnitzer, M. and Kodama, H. 1977. Reactions of minerals with a soil humic compound. p. 741-770 in J.B. Dixon, ed. Minerals in soil environments. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisc.

- Shoji, S., Fujiwara, Y., Yamada, I. and Saigusa, M. 1982. Chemistry and clay mineralogy of Ando Soils, Brown forest soils, and Podzolic soils formed from recent Towada ash, northeastern Japan. *Soil Sci.* 133: 69-86.
- Soil Conservation Service. 1975. *Soil Taxonomy*. Agric. Handb. n° 436. U.S. Dep. Agric., Wash. D.C. 754 p.
- Tait, J.M., Yoshinaga, N. and Mitchell, B.D. 1978. The occurrence of imogolite in some Scottish Soils. *Soil Sci. Plant Nutr* 24: 145-151.
- Tamura, T. 1958. Identification of clay minerals from acid soils. *J. Soil Sci.* 9: 141-147.
- Visser, S.A. 1985. Viscosimetric studies on molecular weight fractions on fulvic and humic acids of aquatic, terrestrial and microbial origin. *Plant and Soil* 87: 209-221.
- Wada, K. and Yoshinaga, N. 1969. The structure of imogolite. *Am. Miner. Miner.* 54: 50-71.
- Wall, G.J. 1969. An investigation of two Podzol-like profiles developed on calcareous materials. M. Sc. Thesis, Soil Science, Univ. of Guelph, Guelph, Ont. 70 p.
- Wang, C. and Kodama, H. 1986. Pedogenic imogolite in sandy Brunisols of eastern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 66: 135-142.
- Wang, C. and McKeague, J.A. 1982. Illuviated clay in sandy Podzolic soils of New Brunswick. *Can. J. Soil Sci.* 62: 79-89.
- Wang, C., McKeague, J.A. and Kodama, H. 1986. Pedogenic imogolite and soil environments: a case study of spodosols in Quebec, Canada. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50: 711-718.
- Yoshinaga, N. and Aomine, S. 1962. Imogolite in some Ando soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 8: 22-29.

HUMIC-CLAY INTERACTIONS IN SOIL, AND IN PARTICULAR PODZOL, PROCESSES

S. A. Visser¹

ABSTRACT

Soil organic matter after its transformation into humic compounds can interact in various ways with clay minerals. The humic compounds can be adsorbed on to the clay surface and in this way change many of the clay's properties such as its surface potential and its ability to interact with other clay particles. The type and intensity of humic-clay interactions depend on the size of the clay particle, the ionic strength, pH and humidity in the environment, as well as on the type of humic substance and its molecular weight. Humus-clay interactions play an important role in many soil processes such as aggregate stabilization, weathering, mineral cycling and profile development.

It is customary to divide soil organic matter in 2 fractions: a) Free organic matter which is rather recently formed and can be obtained by flotation. It is made up of different classes of organic compounds such as simple sugars, polysaccharides, organic acids, amino acids, proteins, hemicelluloses, celluloses, lignins and various humus forms. b) Bound organic matter which is for the greater part linked to soil minerals. Its constituents have undergone a series of transformations and consist to a large extent of humus forms of different age and complexity.

¹ Département des Sols, Université Laval, Québec, G1K 7P4

Conversion of organic matter by microbes. The microflora active in the transformation of the bulk of organic matter varies according to environmental conditions. Under moderately humid conditions fungi and actinomycetes are particularly active, whereas under wet conditions bacteria are the principal organisms. In the course of the transformation processes microorganisms will assimilate nitrogen and use part of the available carbon as an energy source. This will result in a gradual fall of the $\frac{C}{N}$ ratio to a value of approximately 10. By its metabolic activity, the microflora will transform a substantial part of the organic matter into compounds which will participate in humus formation.

Humics, structure and general properties. The humic matter being formed during organic matter transformation, consists of brown-coloured polyanions. These substances arise, in particular, from microbial breakdown of organic matter, followed by polymerization and condensation of the degradation products by reactions of mainly a chemical nature. Humic substances usually contain aromatic as well as aliphatic structures to which are attached a number of functional groups such as $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{OH}$, and $-\text{C}=\text{O}$. The latter are to a large extent responsible for the chemical and physicochemical properties of humic matter (Schnitzer & Khan, 1972; Stevenson, 1982).

Humic substances play an important role in soil and podzolic processes, in particular by interacting with clay minerals and multivalent ions.

CLAYS, GENERAL STRUCTURE AND PROPERTIES

Clay minerals are primarily crystalline hydrous aluminosilicates, the component silicon oxide tetrahedral and aluminium hydroxide octahedral

sheets of which are associated either in a 2:1 ratio (Si-Al-Si) or a 1:1 ratio (Si-Al).

The 2:1 layer clays (Fig. 1), especially smectites, tend to expand upon wetting, exposing a significant internal surface area between adjacent silicon layers. The 1:1 layer clays (Fig. 2) do not normally expand upon wetting.

The 2:1 layer clays are particularly subject during morphogenesis to isomorphous substitution, a process wherein structural cations (e.g. Si^{4+} , Al^{3+}) are replaced by those of a lower valency (e.g. Al^{3+} , Fe^{2+}). The permanent net negative charge which this process imparts to the clay is compensated for by exchangeable cations (e.g. Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , NH_4^+) adsorbed from the soil solution. It is expressed as the cation exchange capacity (CEC) of the clay (Table 1). The charged surface with its associated ions are collectively termed the electrical or diffuse double layer (Stotzky & Burns, 1982). In very dilute solutions this double layer of counter ions and solvent molecules can be up to at least 100 nm thick, whereas in solutions rich in salts it is considerably depressed (Rashid *et al.*, 1972).

HUMIC-CLAY INTERACTIONS

Interaction of humics with metal ions. In the presence of humics, polyvalent metal ions such as Al^{3+} and Fe^{3+} will enter in complexation and/or chelation reactions with the anionic groups of the humic molecule (Fig. 3). This interaction is normally accompanied by the release of protons, leading to a decrease in solution pH (Van Dijk, 1971). Polyvalent metal ions can also readily form polyhydroxy complexes whose aquo and hydroxo groups may then enter into ligand exchange with the humic anionic groups.

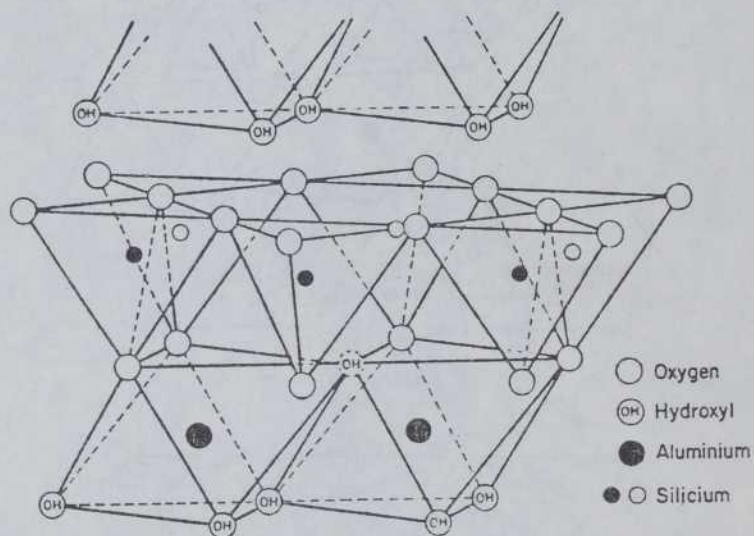


Fig. 2. Relation between annual litter production and latitude. After Bray & Gorham (1964).

Table 1 Some properties of soil clay and organic colloids. After Stotzky & Burns (1982).

Colloid type	layering	swelling	Surface area (m^2g^{-1})	CEC (mEq g^{-1})
Kaolinite	1:1	non-expanding	25- 50	0.02-0.1
Vermiculite	2:1	expanding	500-700	1.2-2.0
Smectite	2:1	expanding	700-750	0.6-1.3
Organic matter		expanding	500-800	2.0-5.0

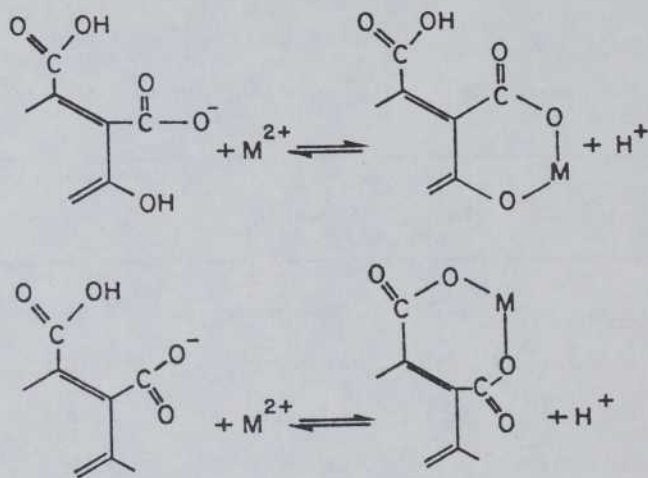


Fig. 3. Complexation/chelation of a polyvalent cation by part of a humic molecule. After Stevenson (1982).

The actual adsorption occurs mainly by means of H bonding (Fig. 4).

Adsorption of humics on clay surfaces. Humic material adsorbed on clay surfaces by the latter type of mechanism can normally be displaced to a large extent by water molecules. (Theng, 1976a, 1976b).

Furthermore, polyvalent cations may act as "bridges" between the anionic groups of the humic polymer and negatively charged sites on a clay surface (Fig. 5). According to Scharpenseel & Kruse (1972), certain organic molecules such as basic amino acids, can likewise act as bridges between clay mineral particles and humic molecules (Fig. 6).

Effect of pH on interactions. Adsorption of humics on clay minerals is enhanced at low pH, when the surface potentials on both the clay and humic matter are reduced as a result of neutralization of the negatively charged sites. It is also possible that aluminium exposed at clay crystal edges, when acquiring a positive charge at low pH, will contribute to the adsorption of polyanions (Theng, 1982).

Under conditions of low pH, when humics behave and adsorb as an uncharged species (Schnitzer & Kodama, 1966), it is moreover likely that certain types of humic molecules will be able to enter the interlayer space of expanding layer silicates.

Effect of physical state of clay particles on interactions. Many clay minerals, in particular those with isomorphous substitutions and/or crystal lattice imperfections, are able of adsorbing polyanions either by chemisorption or by means of Van der Waals forces. As a result of a large number of broken bonds spread over a large surface area, a high adsorptive capacity is particularly shown by fine grained minerals.

Effect of ionic strength on interactions. Due to the extensive double layers surrounding both the clay particle and the humic molecule in weak

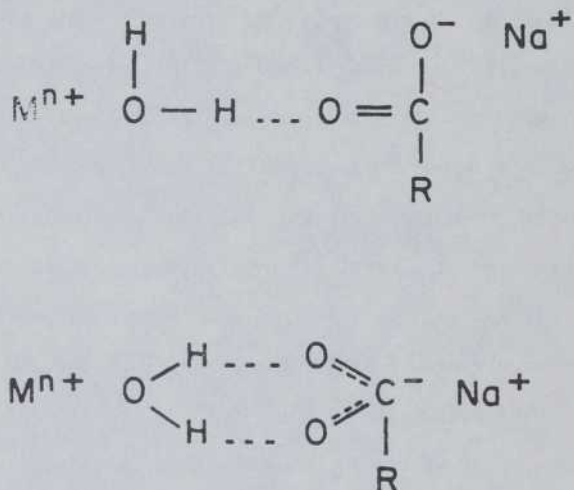


Figure 4. Adsorption of a humic substances on a clay surface by means of a water bridge between a carboxylate group and a polyvalent cation. After Theng (1976^a, 1976^b).

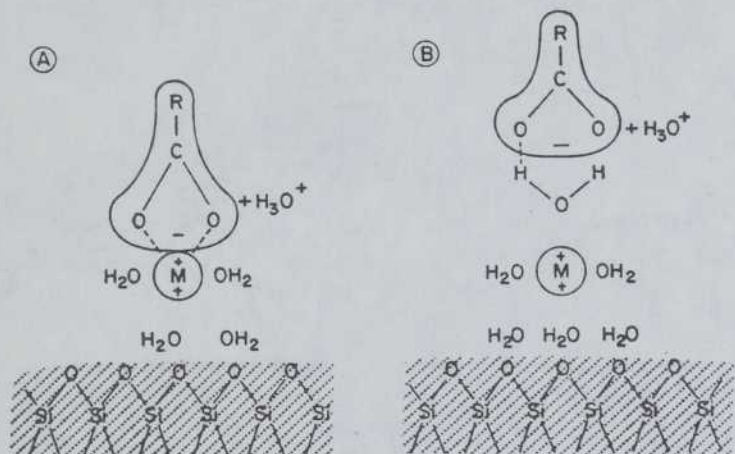


Figure 5. Suggested interaction of anions with mica-type clay surfaces through polyvalent cation bridges.
 A. anion associated directly with cation,
 B. anion associated with cation via a water bridge. After Stevenson (1982).

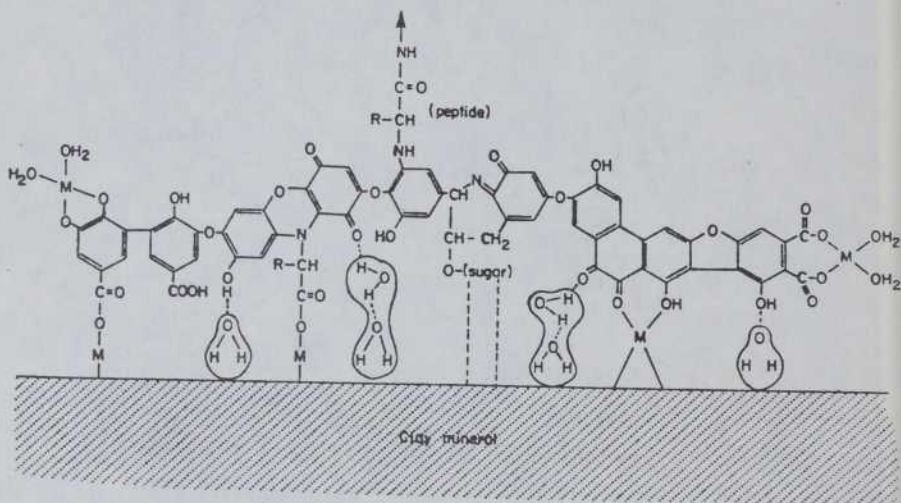


Fig. 6. Schematic diagram of a clay-humate complex in soil. After Stevenson (1982).

ionic solutions, adsorption of humics on clay minerals is often minimal under these conditions.

As a result of the polar nature of clay and humic particles, Van der Waals forces will become progressively more important as a binding mechanism, as the double layer decreases in thickness (Rashid *et al.* 1972). In salt-rich environments adsorption will, therefore, be enhanced as a result of increased formation of Van der Waals bonds. At higher ionic strengths the negative charge of the polyanion molecule will become effectively neutralized, eliminating the repelling coulombic forces which normally exist between polyanions and clay surfaces, and allowing even closer contact between the two materials.

The extent of the hydrated double layer will, of course, also be reduced under drying conditions. Alternating dry and wet conditions are particularly favorable for the formation of clay-humus aggregates in soils: whereas humid conditions accelerate the process of organic matter decomposition and humification (Duchaufour, 1977), dry spells will favour the formation of tight bonds between humic matter and the clay surface.

Clay-humic adsorption isotherms. Linear adsorption isotherms, such as observed in the case of humics-montmorillonite systems (Fig. 7), generally indicate that the number of accessible sites on the adsorbant's surface does not diminish as adsorption progresses. Normally this implies the presence of a microporous solid substrate surface. In the montmorillonite-humics system, however, the linear adsorption isotherm cannot be explained by assuming solute entry into the mineral interlayers, as no intercalation of humics has ever been observed at near neutral pH (Evans & Russell, 1959; Schnitzer & Khan, 1972). Theng (1976b) explained

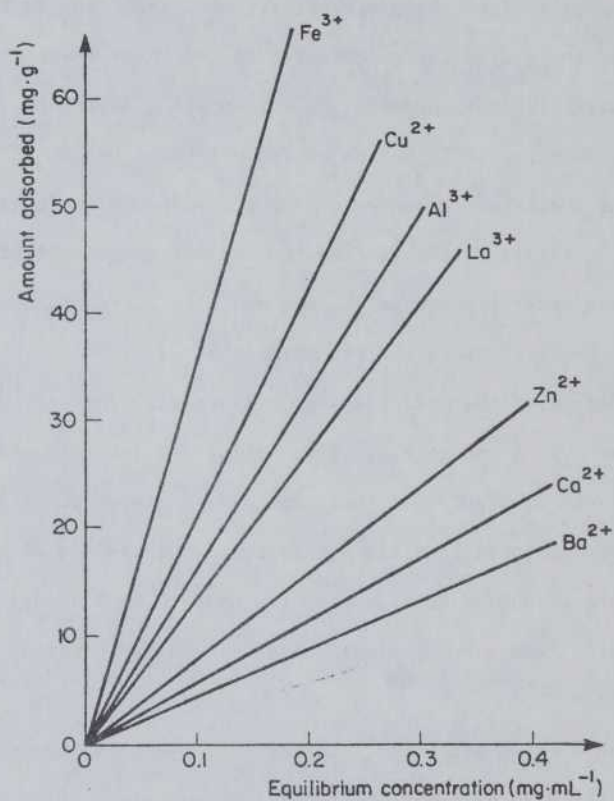


Fig. 7. Isotherms for the adsorption at 20°C and pH 7 of fulvic acid by montmorillonite saturated with different cations. After Theng (1982).

the linear adsorption isotherm in terms of humic molecules forcing an entry into the pores between similarly-orientated clay crystals, thus making gradually more surface area available. Another possible explanation would be the formation of a second layer of adsorbed solute molecules over the first one (Giles *et al.*, 1974).

Effect of particle size on adsorption. Whereas under conditions of non-restricted surface accessibility, the amount of an adsorbed polymer increases with its size and molecular weight, in the case of "porous" systems, such as referred to above, molecules beyond a certain size will be physically excluded from some of the pore surfaces. Polymer uptake thus decreases with increasing molecular size (weight) (Stotzky & Burns, 1982).

Chakraborty *et al.* (1970) observed a close relationship between the size of clay-humus aggregates and the size (molecular weight) of the adsorbed humic molecules. Smaller clay-humus aggregates (< 0.2 μ m) appeared to contain a higher proportion of high molecular weight humic molecules (> 50 000), while larger aggregates contained a greater proportion of smaller sized ones (< 4 000). As reason has been suggested that in smaller molecular weight humics, because of their higher acidity, the mutual repulsion between negatively charged groups will lead to a more stretched configuration and therefore to a larger and more effective surface area, giving rise to more stable aggregates.

Structure of adsorption layer. Chassin (1979) proposed that the clay-humus complex is made up of 3 layers (Fig. 8): the inner layer consisting of substances of aliphatic character, the intermediate one being mainly of an aromatic nature (humic acids) and the outer layer, of a relatively high aliphatic character, being made up of fulvic acids.

It is interesting to note that aliphatic humic structures would

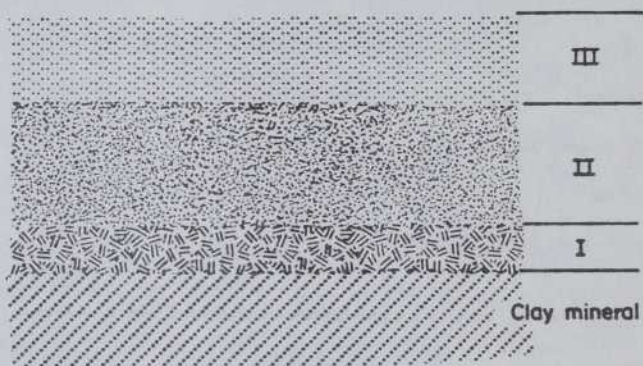


Fig. 8. Schematic diagram of humic-clay complex.
I and III: molecules having a relatively high aliphatic component. II: molecules having a relatively high aromatic component.
After Chassin (1979).

appear to be more common in humics derived from fine clays than in humics obtained from coarse clay fractions (Arshad & Lowe, 1966).

Adsorption of humics on clay external surface. It has been estimated that 2 g of humic acid can cover the external surface of 100 g of montmorillonite with a monomolecular film (Chassin, 1979). Kaolinite which is more apt to develop positive charges at the edges of its clay particles is likely to adsorb higher amounts of anionic organic matter than would montmorillonites at their external surface (Arshad & Lowe, 1966).

Adsorption of humics on clay internal surface. Whereas uncharged polymers and polycations are able to enter the interlayer space of expanding 2:1 type layer silicates without much difficulty, polyanions, such as humics, generally fail to penetrate layer silicates under normal soil conditions (Flaig & Beutelspacher, 1951; Greenland, 1965; Arshad & Lowe, 1966; Dudas & Pawluk, 1969; Gorbunov *et al.*, 1971; Chassin *et al.*, 1977; Duchaufour, 1977; Hayes & Swift, 1978; Theng, 1979). There is evidence, however, that intercalation of humics may occur at conditions of low pH, when the molecule behaves as a predominantly uncharged species (Schnitzer & Kodama, 1966; Schnitzer & Khan, 1972).

Some authors have suggested that the presence of humic substances in interlamellar spaces may be the result of the former having been formed in situ from small molecules. Aromatic radicals being able to participate in polymerization reactions can, for instance, be formed by electron transfer between certain aromatic compounds and a number of transition metal cations occupying exchange sites in the interlayer space of smectites (Cloos *et al.*, 1981). The possibility has also been raised that, in the course of mineral formation, humic molecules can be trapped and

preserved in the interplanar spacings of the forming mineral (Kovda & Trubin, 1977).

Microbial degradation of adsorbed organic matter. As most of the organic matter dispersed in a soil is bound to the clay fraction, microbial decomposition of the soil organic fraction occurs mainly on the clay-bound rather than on the diffuse free material. The fact that smaller molecular weight humics are often more resistant to microbial attack than higher molecular weight material, has been ascribed to the ability of the smaller and more flexible molecules to spread themselves to a larger extent on the clay surface. In this way they can be less susceptible to attack by microbial enzymes than more rigid and less deformed larger molecular weight humics (Varadachari *et al.*, 1984)

Effect of humics on aggregation and dispersion of clays. Aromatic and aliphatic polycarboxylic acids with a larger than 10^4 nominal molecular weight have been shown to play a major role in the dispersion of kaolinite in soils (Durgin & Chaney, 1984). When flocculated, the clay mineral commonly forms a cardhouse-type structure (Schofield & Samson, 1954) with the positively charged edges of the particles attached to the negative faces. Because of their negative charge, organic anions are able to offset the positive charge of the clay and promote, in this way, its dispersion. Once dispersed, the kaolinite particles can be carried by the water moving through the soil profile. According to Bloomfield (1954) this process contributes in podzols to the formation of clay-leached A horizons. Migration will continue down to the spodic Bh horizon, where the dispersed clay minerals are deposited and accumulate.

Degradation of clays by humics. Interaction between organic matter and clay can lead to the liberation of a number of elements such as K^+ , Mg^{2+} ,

Fe^{2+} and Al^{3+} by means of exchange reactions involving protons. Certain elements may also be mobilized in the form of organo-metallic complexes.

Dilute fulvic acid solutions (0.025-0.1%) have been shown to dissolve substantial amounts of Si, Al, Fe, Mg and K (the latter in the case of biotite only) from chamosite and biotite (Fig. 9). The rate was such that it would have taken a 0.025% fulvic acid solution about 22 years to completely dissolve 1 g of Mn- and Mg-bearing Fe-chlorite, or 7.2 years to dissolve 1 g of biotite (Kodama *et al.*, 1983). In long-term experiments lasting 4-5 years, Sadio (1982) demonstrated by means of granulometric analyses, a rapid decrease in the size of clay particles introduced in the A_1 horizon of various forest soils.

Sadio (1982) also reported that biotite, as a result of an appreciable loss of K as well as of Fe and Mg, developed interstratified structures of the mica-vermiculite and mica-chlorite type in the humus layer of a forest soil, in the course of a 4 year residence period. Mica-vermiculites are less vigorously attacked by organic acids than the biotites out of which they were formed. The main phenomenon in this case is not the loss of potassium, but the partial extraction of Fe^{+++} . From chlorite minerals, especially those rich in Fe, substantial amounts of Al, Fe and Mg can be selectively eliminated under acid conditions by the interaction of protons with the crystal lattice cation (Table 2). The same phenomenon has been observed in the case of gibbsite (Table 3). This type of process can finally lead to a virtually complete destruction of the mineral.

Fulvic acids and other complexing organic acids have been shown to be more efficient in attacking clays than mineral acids under similar pH conditions (Kodama & Schnitzer, 1973). Furthermore, as a result of their higher content of acidic functional groups, low molecular weight

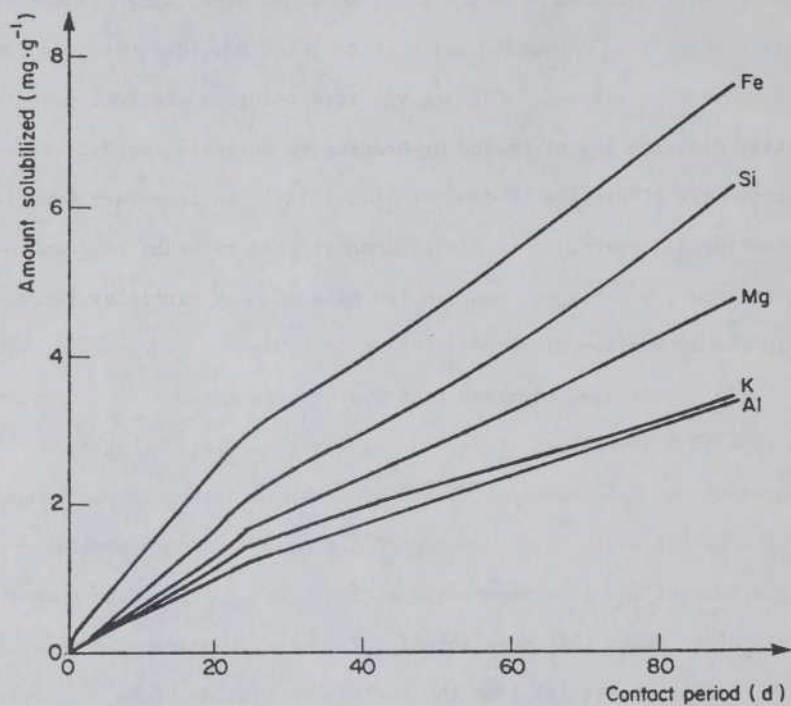


Fig. 9. The dissolution by 0.025% FA solution of Si, Fe, Al, Mg and K from biotite in an open system (flow rate: 1 ml.h^{-1}). After Kodama et al. (1983).

Table 2 Dissolution of cations from a chlorite (Leuchtenbergite) by 0.2% aqueous fulvic acid solution and by dilute HCl solution, both initially at pH 2.5 (mg per g of sample and per l of solution). After Kodama & Schnitzer (1973).

Time (days)	FA			HCl		
	Al	Fe	Mg	Al	Fe	Mg
2	2.0	0.40	3.50	1.10	0.40	1.70
5	3.20	0.90	5.70	1.20	0.30	2.90
8	3.20	1.00	6.90	1.30	0.70	2.70
13	4.20	1.00	8.50	1.90	0.50	4.40
15	4.80	1.20	9.00			

Table 3 Attack of gibbsite ($0.45 - 2 \mu\text{m}$) with a fulvic acid solution (30 mg C.l^{-1}). After Righi et al. (1982).

contact period (days)	Al in solution (mg.l^{-1})	reference
		HCl pH= 40
		Al in sol. (mg.l^{-1})
1	0.31	
2	0.47	
4	0.62	
7	1.02	
14	0.94	
21	0.94	0.31

fractions will interact more strongly with clay minerals than high molecular weight material. After having been in contact with kaolinite, lower molecular weight fractions of humic acids remaining in solution were found to be richer in Al, whereas higher molecular weight material was particularly rich in Si (Sadio, 1982). The latter element is normally bound to organic colloids by means of hydrogen bonds.

Formation of clays from organo-mineral complexes. Degradation products obtained as a result of the action of fulvic acids on minerals can, depending of their Mg/Si ratio and the environmental pH, gradually be transformed into new crystalline forms (Dupuis *et al.*, 1982). Aqueous fulvic acid solutions may, therefore, not only bring about the dissolution or degradation of existing minerals, but the complexed and dissolved metals and silica may also participate in the formation of new minerals (Schnitzer & Kodama, 1977). Kovda & Trubin (1977) observed, for instance, the synthesis of montmorillonite type minerals from organo-mineral compounds.

ROLE OF CLAY-HUMUS INTERACTIONS ON SOIL PROCESSES

Clay-humus interactions play an important role in many soil processes such as mineral cycling, weathering, profile development and aggregate stabilization.

Role of humics in podzol formation. The higher the biological activity in a soil, the lower will normally be the amount of available mobile organic substances, or the shorter the period during which they are present. A low production of mobile organics generally results in their immobilization by di- and trivalent ions such as Fe and Al. Podzols, however, with their low biological activity, normally have a good supply of mobile acidic organic substances which, by influencing the migration of mineral par-

ticles, will contribute greatly to the morphological development of the typical podzol profile. Because of their acidity, these organic compounds can depolymerize amorphous alumina into its monomeric form and, as a result of their power of adsorption and complexation, they are able to lower the ionic activity of mono - and divalent ions. This can occur to such an extent that eventually these ions are not any longer able to flocculate dispersed clay-organic matter associations or to prevent already flocculated clay particles from becoming dispersed and mobile.

Because monovalent cations do not form covalent bonds with organic radicals and as, because of double layer formation, they are, at normal concentrations, unable to immobilize soluble humics, they will gradually be leached from the horizon. These phenomena would appear to contribute to the formation of the ion-poor clay-leached podzol A horizon (Guillet et al., 1981).

Organic substances are also considered to be of primary importance in the development of the B horizon of podzols, the so-called spodic horizon which consists of an accumulation of active amorphous material composed of organic matter together with Al and Fe or only Al. In the course of their downward migration through a soil profile, organo-metallic complexes can be immobilized by a number of factors such as complexation with supplementary cations, contact with regions of high ionic concentration and/or acidity, or by conditions of desiccation which will lead to increased ionic concentrations and a contraction of double layers (de Coninck, 1980). In the B horizon, additional cations may be chemisorbed by the mobile organic matter without contributing, however, to the formation of a well-developed double layer. The lack of repulsion between the organic molecules will allow them to approach one another to such an

extent that they will become immobilized, giving rise to an accumulation in this horizon of both organic matter and bi- and trivalent cations.

REFERENCES

- ARSHAD, M. A. and LOWE, L. E. 1966. Fractionation and characterization of naturally occurring organo-clay complexes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 30:731-735.
- BROOMFIELD, C. 1954. The deflocculation of kaolin by tree leachates. *Trans. 5th Congr. Soil Sci.* 2:280-283.
- BRAY, R. and GORHAM, E. 1964. Litter production in forests of the world. *Adv. Ecological Research* 2:101-157.
- CHAKRABORTY, G., BANERJEE, S. K. and GUPTA, S. K. 1979. Molecular weights and total acidities of humic acids extracted from soil aggregates of different sizes. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 27:129-132.
- CHASSIN, P. 1979. Hypothèse sur la structure du complexe argilo-humique. Conséquences sur les processus d'humidification. *Bull. Assoc. Franç. Etude Sol (1979)*:323-332.
- CHASSIN, P., NAKAYA, N. and LE BERRE, B. 1977. Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. II. Adsorption des acides humiques et fulviques par la montmorillonite. *Clay Minerals* 12: 261-271.
- CLOOS, P., BADOT, C. and HERBILLON, A. 1981. Interlayer formation of humin in smectites. *Nature* 289:391-392.
- DE CONINCK, F. 1980. Major mechanisms in formation of spodic horizons. *Geoderma* 24:101-128.
- DUCHAUFOUR, P. 1977. *Pédologie* vol. 1. Masson, Paris.

- DUDAS, M. J., PAWLUK, S. 1969. Naturally occurring organo-clay complexes of orthic black chernozems. *Geoderma* 3:5-17.
- DUPUIS, Th., JAMBU, P. and DUPUIS, J. 1982. Etude expérimentale de l'action des acides fulviques sur les gels silico-magnésiens et les silicates magnésiens. *Bull. Assoc. Franç. Etude Sol.* (1982):241-252.
- DURGIN, P. B. and CHANEY, J. G. 1984. Dispersion of kaolinite by dissolved organic matter from Douglas-fir roots. *Can. J. Soil Sci.* 64: 445-455.
- EVANS, L. T. and RUSSELL, E. W. 1959. The adsorption of humic and fulvic acids by clays. *J. Soil Science* 10:119-132.
- FLAIG, W. and BEUTELSPACHER, H. 1951. Zur Kenntnis der Huminsäuren. 2. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an natürlichen und synthetischen Huminsäuren. *Z. Pfl. Ernähr. Düng. Bodenk.* 52:1-21.
- GILES, C. H., D'SILVA, A. P. and EASTON, I. A. 1974. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. II. Experimental interpretation. *J. Colloid Interface Sci.* 47:766-777.
- GORBUNOV, N. I., YEOKHINA, G. L. and SHCHURINA, G. A. 1971. Relationship between soil minerals and humic substances. *Soviet Soil Science* (1971):468-480.
- GREENLAND, D. J. 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soils & Fertilizers* 28:521-532.
- GRIM, R. E. 1968. *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, New York. pp. 596.
- GUILLET, B., ROUILLER, J. and VEDY, J. C. 1981. Dispersion et migration de minéraux argileux dans les podzols. Contribution des composés organiques associés, leur rôle sur les formes et l'état de l'alu-

- minium. C. R. Coll-Intern. C.N.R.S. no 303. Migrations organo-minérales dans les sols tempérés. Nancy, 1979, p. 49-55.
- HAYES, M. H. B. and SWIFT, R. S. 1978. In: The Chemistry of Soil Constituents Ch. 3. Eds. D. J. Greenland and M. H. B. Hayes. Wiley, New York.
- KODAMA, H. and SCHNITZER, M. 1973. Dissolution of chlorite minerals by fulvic acids. *Can. J. Soil Sci.* 53:240-243.
- KODAMA, H., SCHNITZER, M. and JAAKKIMAINEN, M. 1983. Chlorite and biotite weathering by fulvic acid solutions in closed and open systems. *Can. J. Soil Sci.* 63:619-629.
- KOVDA, V. A. and TRUBIN, A. I. 1977. Effect of humic acids on the synthesis of a mineral of the montmorillonite group. *Soviet Soil Science* 9:95-104.
- MANGENOT, F. and TOUTAIN, F. 1980. Les litières. In: *Actualités d'Ecologie Forestière*. Edit. Pesson, p. 3-59.
- RASHID, M. A., BUCKLEY, D.E. and ROBERTSON, K. R. 1972. Interactions of a marine humic acid with clay minerals and a natural sediment. *Geoderma* 8:11-25.
- RIGHI, D., DUPUIS, T. and GIRAULT, P. 1982. Altération expérimentale de gibbsite par des acides fulviques. Conséquences pédologiques pour les sols du plateau de Millevaches. *Science du Sol.* 2:145-152.
- SADIO, S. 1982. Altération expérimentale de phyllosilicates - tests sous végétations forestières acidifiantes. Thèse, Université de Nancy I.
- SCHARPENSEEL, H. W. and KRUSE, E. 1972. Amino acids in clay-humic acid complex formation. In: *Isotopes and Radiation in Soil-Plant Relationships Including Forestry*. International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 193-210.

- SCHNITZER, M. and KHAN, S. U. 1972. Humic Substances in the Environment. Marcel Dekker, New York. pp. 327.
- SCHNITZER, M. and KODAMA, H. 1966. Montmorillonite: effect of pH on its adsorption of a soil humic compound. *Science* 153: 70-71.
- SCHOFIELD, R. K. and SAMSON, H. R. 1954. Flocculation of kaolinite due to the attraction of oppositely charged crystal faces. *Disc. Faraday Soc.* 18:135-145.
- STEVENSON, F. J. 1982. Humus Chemistry. John Wiley, New York. pp. 443.
- STOTZKY, G. and BURNS, R. G. 1982. The soil environment: clay-humus-microbe interactions. In: *Experimental Microbial Ecology* Eds. R. G. Burns and J. H. Slater. Blackwell, Oxford, p. 105-133.
- THENG, B. K. G. 1976a. Note on the bonding of humic acid to montmorillonite. *New Zealand J. Science* 19:57-59.
- THENG, B. K. G. 1976b. Interactions between montmorillonite and fulvic acid. *Geoderma* 15:243-251.
- THENG, B. K. G. 1979. Formation and Properties of Clay-Polymer Complexes. Elsevier, Amsterdam.
- THENG, B. K. G. 1982. Clay-polymer interactions: summary and perspectives. *Clay and Clay Minerals* 30:1-10.
- VAN DIJK, H. 1971. Cation binding of humic acids. *Geoderma* 5:53-67.
- VARADACHARI, C., BISWAS, N. K. and GHOSH, K. 1984. Studies on decomposition of humus in clay-humus complexes. *Plant and Soil* 78:295-300.

MICRO-RELIEF, DYNAMIQUE ET ÉVOLUTION DES SOLS
AU QUÉBEC MÉRIDIONAL

Jean-Louis Brown¹

RÉSUMÉ

Le micro-relief module localement l'expression des facteurs pédogénétiques qui différencient lentement le solum en horizons distincts. Il reflète aussi et surtout l'existence de phénomènes beaucoup plus ponctuels et draconiens qui bouleversent, brassent, mélangent et enfouissent différentes parties ou horizons du sol. Ces derniers phénomènes contrecarrent le travail des premiers et créent une grande variabilité, sur de courtes distances, dans les propriétés physico-chimiques du sol. Ils compliquent d'autant l'étude et la caractérisation du sol. L'analyse globale de ces phénomènes et de leurs interactions permet de mieux comprendre la dynamique et l'évolution du sol.

Le micro-relief est intimement lié à la dynamique des sols. Il est non seulement un facteur qui influence directement le développement du sol, mais aussi, sa genèse est associée à des changements beaucoup plus draconiens encore dans le solum. Son existence révèle une grande variabilité, sur de courtes distances, dans les propriétés physico-chimiques du sol.

Cet étude ne porte que sur des sols minéraux non en culture, bien que la plupart des sols actuellement cultivés aient été à l'origine des sols forestiers et que, de ce fait, plusieurs renferment encore dans le solum les traces des phénomènes dont il sera question ici.

¹ Service de la recherche appliquée, Ministère de l'Énergie et des Ressources, 2700, rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1P 3W8.

En premier lieu, nous présentons les principaux types de micro-relief en forêt et leur influence directe sur le développement des sols. La genèse de ces micro-formes et leur structure interne sont ensuite décrites de façon plus détaillée, afin de relier la variabilité du sol aux différents éléments ou parties du micro-relief, et de tenter par la suite de prévoir cette variabilité. Pour terminer, on discute le rôle que ces phénomènes jouent en relation avec la dynamique et l'évolution du sol au Québec méridional.

Influence du micro-relief sur le développement du sol

En forêt, la surface du sol est caractérisée par un micro-relief constitué principalement de micro-buttes et de micro-dépressions plus ou moins apparentes. Sous forêt feuillue climacique, par exemple, environ 30% des micro-buttes peuvent être très accusées et, de ce fait, perceptibles d'un premier coup d'oeil.

En y regardant de plus près, on s'aperçoit qu'il y a de plus toute une gamme de micro-formes allant des micro-buttes bien apparentes jusqu'aux micro-buttes à peine perceptibles ressemblant à des replats plus ou moins ondulés ou des plateaux peu élevés.

Les dimensions de ces micro-buttes dépendent de la taille, de l'essence et de la vigueur des arbres qui ont été déracinés, et du temps écoulé depuis. On observe dans la forêt feuillue des micro-buttes mesurant entre 2 et 7 m de longueur, 1,50 et 3 m de largeur et 30 cm à 1 m de hauteur.

Il existe également des micro-cuvettes plus ou moins importantes, dont la longueur est fonction de celle de la micro-butte à laquelle elle est associée et dont la largeur, souvent réduite à une étroite gouttière, dépend de l'âge de la micro-butte. La profondeur des micro-cuvettes diminue également avec le temps.

Il peut exister aussi de véritables micro-replats qui ne sont pas d'anciennes micro-buttes aplaties avec le temps. Ils sont cependant

toujours de petites dimensions et beaucoup plus rares que les autres micro-formes déjà énumérées.

L'accumulation de matière organique en plus grande épaisseur dans les micro-dépressions et autour des obstacles vient atténuer le micro-relief et en masquer certains traits mineurs (Brown 1979; McFee et Stone 1965).

Cette dernière observation met en évidence un premier effet du micro-relief, qui favorise l'accumulation des feuilles mortes en plus grande quantité dans les micro-dépressions par rapport aux sommets des micro-buttes et, par la suite, des quantités plus importantes de matière organique dans ces endroits.

Dans les érablières à bouleau jaune des basses Laurentides par exemple, la couche H de l'humus peut mesurer aussi peu que quelques millimètres au sommet des micro-buttes, alors qu'elle peut atteindre plusieurs centimètres dans les micro-cuvettes. Dwyer et Merriam (1981) ont estimé pour une forêt de hêtre et d'érable à sucre en Ontario, que le poids sec de la litière sur les replats et dans les dépressions était respectivement égal à 3 fois et à 6 fois celui des sommets de micro-buttes. Dans une forêt de feuillus nordiques du New Hampshire, Hart *et al.* (1962) signalent que l'épaisseur de l'humus sur les pentes des monticules était environ le double de celle rencontrée au sommet et que dans les dépressions, cette épaisseur atteignait environ quatre fois celle observée sur les sommets.

Une première conséquence de ces grandes différences dans l'accumulation de la litière et, par la suite, dans l'épaisseur de l'humus, est une isolation différente du sol selon les éléments ou parties du micro-relief. Ceci se traduit par un retard dans le réchauffement de la surface du sol minéral au printemps, et par des températures moins variables et une moyenne plus froide dans les dépressions au cours de la saison estivale (Dwyer et Merriam 1981). En période de basse température ou pendant l'hiver en l'absence d'un couvert de neige, les micro-buttes seraient plus susceptibles au gel. Hart *et al.* (1962) ont observé dans la forêt expérimentale de Hubbard Brook, que le gel affectait principalement le sommet

des micro-buttes, où l'humus est le plus mince tandis que dans les dépressions, le gel était absent.

En plus de ces variations de température, on constate également des différences dans le régime hydrique en fonction du micro-relief. Cependant, à part une accumulation de neige plus grande dans les micro-dépressions et sa fonte quelques jours plus tard, il n'y a pas, dans les conditions normales sous nos forêts, de concentration d'eau de pluie par le ruissellement dans les micro-cuvettes.

Même pendant de gros orages, nous n'avons pas pu observer en forêt de ruissellement à la surface du sol. Celui-ci est empêché en partie par le couvert végétal, qui intercepte une partie de la précipitation, et par l'effet de buvard de l'humus. En ce sens, la couche de feuilles mortes sous les érablières, par exemple, est particulièrement efficace. Elle protège dans un premier temps le sol contre l'érosion, en absorbant l'impact des gouttelettes d'eau puis, dans un deuxième temps, en absorbant les gouttelettes elles-mêmes.

En conséquence, bien que le micro-relief puisse jouer un rôle important en orientant et en captant dans les dépressions l'eau de ruissellement, cela ne se produit généralement pas sous nos conditions normales en forêt, car il n'y a pas de ruissellement.

Aussi, les différences d'humidité observées dans le sol entre les micro-buttes et les micro-dépressions sont dues à des différences dans l'exposition à l'évaporation, causée par le micro-relief lui-même, à une plus grande isolation du sol dans les micro-dépressions, produites par une couverture d'humus plus importante et, enfin, à l'égouttement plus rapide du sol dans les micro-buttes, résultant d'une plus grande porosité et d'une texture plus grossière, particulièrement dans les micro-buttes les plus récentes. Nous expliquerons ces variations de texture et de porosité par la genèse du micro-relief.

Genèse du micro-relief et impact sur la pédogénèse et la variabilité du sol

En forêt, le micro-relief résulte principalement du chablis ou du renversement des arbres par le vent.

Dans de précédentes publications (Brown 1977; Brown et Martel 1981) la structure et la dynamique du relief formé par le renversement des arbres par le vent ont déjà été décrite en détail.

Rappelons qu'on peut classifier les renversés en quatre types (figure 1), trois types se distinguant selon l'angle fait avec l'horizontale par la "galette" de sol arrachée par les racines, et un quatrième type, en fonction de l'emplacement de la micro-cuvette qui se trouve ici exceptionnellement du côté du tronc. Cette classification permet d'expliquer le mode de sédimentation du matériel et la structure des différentes parties de la micro-butte.

En terrain à pente faible, la galette sol-racines se dresse selon un angle qui s'éloigne peu de la verticale (figure 1a). Nous avons qualifié ce type, de renversé "normal". Voyons schématiquement le bouleversement et le réarrangement des horizons du sol par ce type de renversé. Le matériel arraché par les racines forme avec celles-ci une "galette" dressée perpendiculairement à la pente du terrain. Soumis à la fois aux agents atmosphériques et à la gravité, la "galette" de sol s'érode et se désagrège lentement à mesure que les micro-organismes décomposent le système racinaire qui forme son squelette. Le matériel arraché retourne ainsi lentement au sol, pour combler partiellement la micro-cuvette et donner naissance à une micro-butte. Cette dernière, d'abord très accusée, devient avec le temps de plus en plus arrondie et aplatie.

La nature du matériel et le mode de sédimentation sont différents selon qu'on se trouve du côté du tronc ou du côté de la micro-cuvette. Du côté de cette dernière, le matériel sédimenté provient de la roche-mère et de la base du solum. Il s'agit donc d'un matériel pédogénétiquement peu évolué. Il se dépose plutôt sous forme particulière à mesure

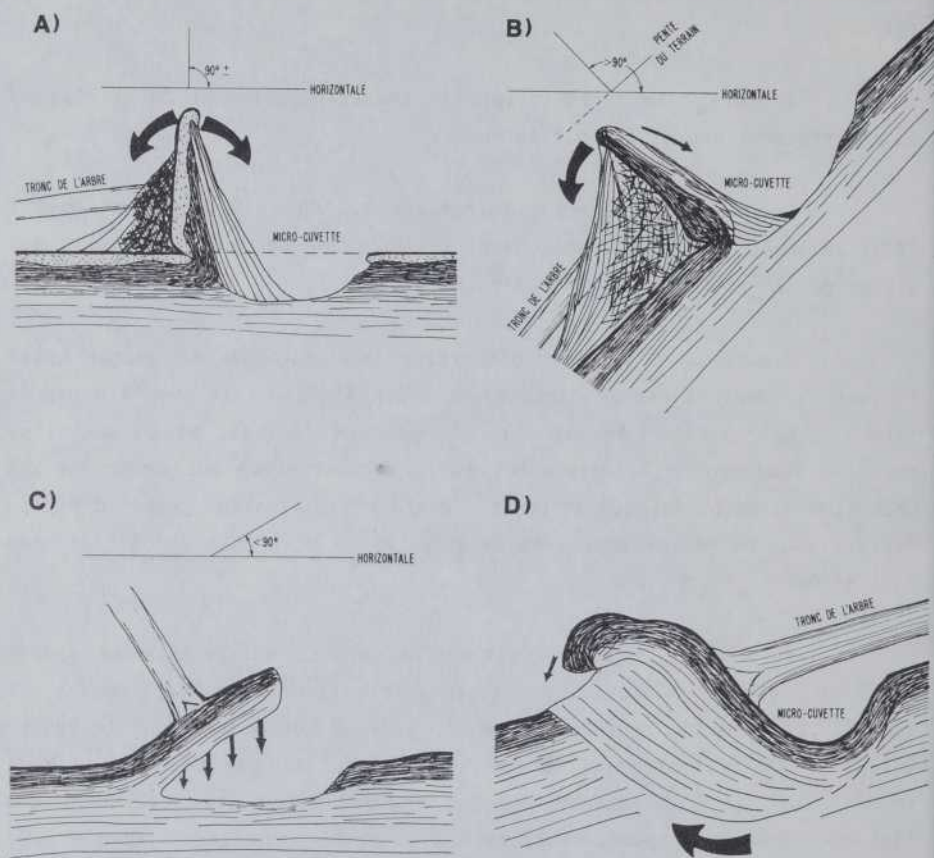


Figure 1: Illustration des quatre principaux types de renversés. A) le renversé «normal»; B) le renversé en pente forte; C) le renversé incomplet; et D) le renversé bouteur qui repousse le sol, pour produire la micro-cuvette du côté du tronc (Brown et Martel 1981)

que l'eau et la glace l'arrachent de la galette sol-racines et que la gravité l'entraîne dans la micro-cuvette. Il finit peu à peu par combler la plus grande partie de celle-ci, ne laissant, dans les renversés les plus vieux, qu'une étroite gouttière partiellement masquée par la litière et l'humus.

Du côté du tronc, le matériel formé des horizons humifères de surface et de la partie supérieure du solum se dépose de façon différente. Protégé de l'érosion par l'humus et une plus grande cohésion des particules, le matériel arraché retourne au sol en blocs, en s'affaissant verticalement et en se retournant pour exposer un sol minéral plus ou moins évolué pédogénétiquement, selon l'épaisseur des couches retournées. Le profil adjacent au renversé se trouve ainsi fossilisé, celui-ci est d'abord recouvert d'une couche humifère, qui est elle-même enterrée à son tour par une couche minérale déposée en blocs dont l'épaisseur diminue à mesure qu'on s'éloigne du centre du renversé.

De chaque côté de la galette sol-racines se forment donc deux talus très différents, que nous avons appelés talus "amont" pour le talus situé du côté d'où est venu le coup de vent qui a déraciné l'arbre, et l'autre talus "aval". Au centre de ces deux talus, la base de la galette sol-racines persiste dans le type de renversé "normal", pour en constituer en quelque sorte l'épine dorsale formée par les horizons A et la partie supérieure de l'horizon B, qui se retrouvent ici dans une position perpendiculaire à leur position normale.

Ce mode de sédimentation se modifie progressivement à mesure que la pente du terrain augmente pour donner dans les pentes fortes un deuxième type de renversé (figure 1b). Dans ces dernières conditions, le matériel de la galette sol-racines tend à se sédimenter de façon de plus en plus importante du côté du talus aval, dont l'importance augmente au détriment de celle du talus amont, qui peut devenir quasi nul sur les pentes très fortes. Le comblement de la micro-cuvette en est alors réduit à se faire presque entièrement par la matière organique accumulée au fil des ans par la chute des feuilles.

Un autre type de renversé se caractérise, au contraire, par l'angle aigu que fait la galette sol-racines avec l'horizontale (figure 1c). Ce dernier se produit lorsque l'arbre déraciné demeure accroché à la cime ou au tronc des arbres voisins qui l'empêchent de la sorte de se renverser complètement. L'arbre ainsi déraciné peut continuer à vivre encore pendant plusieurs années, retenant entre ses racines la majeure partie du sol prélevé. Avec le temps, celui-ci retournera entièrement dans la micro-cuvette à mesure que la carie détruira les racines qui les retiennent.

Enfin, dans le quatrième type de renversé (figure 1d), le système racinaire, pivotant autour d'un axe perpendiculaire au tronc et tangent à la surface du sol, repousse ce dernier vers le côté opposé au tronc pour creuser, exceptionnellement dans ce cas-ci, la micro-cuvette du côté du tronc.

Le profil de sol bascule en quelque sorte autour de cet axe. Du matériel provenant de la base du solum et même de la roche-mère est repoussé en surface du côté du talus amont tandis que du côté aval, les horizons du sommet du profil s'inclinent pour constituer le talus aval qui borde ici la micro-cuvette.

Les descriptions précédentes illustrent une vue schématisée de la perturbation des horizons du sol par les renversés et de la structure interne des micro-reliefs qui en résultent. Une analyse plus détaillée ferait voir une plus grande complexité encore dans la perturbation du sol et dans la sédimentation du matériel déplacé. Cependant, les grands traits des processus décrits ici sont suffisants pour illustrer la complexité des phénomènes en cause et des relations qui existent entre le micro-relief et la variabilité rencontrée, sur de courtes distances, dans les propriétés physico-chimiques des sols forestiers.

Soulignons que le chablis affecte quelque fois en même temps la quasi totalité des arbres sur des superficies assez grandes. Mais le plus souvent, c'est un phénomène plus discret, qui se produit sporadiquement dans l'espace et dans le temps. Cependant, au cours des siècles, il finit

par retourner la plus grande partie du sol. Il explique le fait que le parterre forestier soit jonché de micro-buttes alternant avec des micro-dépressions de tailles et de dimensions différentes dépendant, bien sûr, de la taille et de l'essence renversé, mais aussi de l'âge de la micro-butte.

La datation au C_{14} de profils de sol voisins, dans une érablière à bouleau jaune du Témiscamingue, illustre bien ce phénomène. L'âge apparent (MRT) du profil le plus âgé atteignait $2\,430 \pm 120$ ans (QU-452), soit le double ou presque de celui de deux autres profils, âgés de $1\,350 \pm 90$ ans (QU-453) et de $1\,260 \pm 90$ ans BP (QU-454) et situés respectivement à 1 et 2 mètres du premier (Brown et Martel 1981).

Il peu donc exister et il existe en fait, côte à côte, des profils de sol d'âges différents qui évoluent ou ont évolué à partir d'un matériel de départ s'apparentant pour les uns au dépôt frais ou à la roche-mère originale et, pour d'autres à partir d'horizons ou parties d'horizons déjà fortement évolués pédogénétiquement.

À ces différences dans le sol, induites par les renversés lors de l'édification du micro-relief, s'ajoutent, comme nous l'avons vu dans la première partie, les effets dus aux micro-relief lui-même. Ce dernier module très localement l'expression des facteurs pédogénétiques, en créant des différences dans l'épaisseur de l'humus, le micro-climat, le régime hydrique, les populations de micro-organismes, etc... Pagé (1983) décrit l'alternance, liée au micro-relief et à son incidence sur la profondeur de la nappe phréatique, de podzols bien drainés et de podzols mal drainés ou même de gleysols dans un sable deltaïque.

Aussi ne faut-il pas s'étonner que dans une même station, les profils de sol varient sur de courtes distances (de l'ordre du mètre) au point même de transgresser assez souvent les classes taxonomiques.

Les chablis ne sont pas toujours seuls en cause. Il existe d'autres facteurs, comme les animaux (fourmis, rongeurs, lombrics...), les cycles gel-dégel et humectation-dessiccation, qui créent des micro-reliefs

particuliers. Contrairement aux chablis, qui sont étroitement associés aux forêts et généralisés dans ces dernières, ces autres facteurs peuvent être actifs en l'absence d'un couvert ligneux. Cependant, ils nécessitent eux aussi, pour se manifester, des conditions particulières.

Pour ne mentionner que deux de ces facteurs, soulignons que les fourmis, qui érigent des monticules, sont particulièrement actives en terrain déboisé ou dans les clairières, et que les géliformes produites par les cycles gel-dégel se retrouvent dans certains sols à drainage déficient.

Dynamique et évolution du sol

Tous ces facteurs, qui créent des micro-reliefs et qui bouleversent, mélangent, homogénéisent ou fossilisent les horizons du sol, se manifestent souvent sporadiquement et de façon bien localisée dans l'espace et dans le temps. Il s'opposent à l'expression de processus pédogénétiques qui visent à la différenciation du solum en horizons bien distincts ou la freinent localement.

Le sol est donc soumis à des forces antagonistes qui le façonnent et le remodelent sans cesse. Le micro-relief et les variations des propriétés du sol qui lui sont associées résultent donc du dynamisme du sol, qui est lui-même lié à celui des différents écosystèmes dont il est une composante importante. Le sol, comme les écosystèmes eux-mêmes, est en perpétuelle évolution. Cette évolution se fait au moyen de cycles successifs, où le point d'aboutissement d'un des cycles devient le point de départ du suivant. Ils ne forment pas de boucles fermées, car chacun de ces cycles laisse sa marque dans l'écosystème. Ils s'enchainent plutôt pour former une spirale évolutive.

Pour illustrer ce concept, voyons un segment de cette spirale évolutive depuis la déglaciation jusqu'à nos jours, dans une station actuellement colonisée par l'érablière à bouleau jaune typique (Brown, 1981) au Témiscamingue, Québec. Dans cette station, le till hérité de la

dernière glaciation évolue, depuis environ 10 000 ans, sous l'action conjuguée du climat et de la végétation.

D'après la morphologie et les propriétés chimiques de certains profils de sol rencontrés dans cette érablière, ceux-ci n'ont pu se développer que sous des conditions pédogénétiques (de végétation et de climats) différentes de celles qui prévalent actuellement (Brown, 1977; 1981). Et comme l'a suggéré également Richard (1977, 1978) à la suite d'analyses polliniques effectuées plus à l'est dans le Québec méridional, il semble logique de penser qu'après le retrait du glacier et le réchauffement progressif du climat, la colonisation des terrains dénudés s'est faite par l'envahissement successif de la région par les grandes formations végétales qu'on trouve aujourd'hui plus au nord. Elles se seraient succédées, dans la station étudiée, depuis le désert périglaciaire jusqu'à la végétation actuelle.

La figure 2 illustre une caténa de séries évolutives (chacune des grandes boucles de la spirale) telles qu'elles ont pu se succéder dans la station étudiée depuis le retrait du glacier. Chacune des grandes boucles marque un réchauffement du climat et l'envahissement du milieu par une végétation plus méridionale, avec l'impact qu'on connaît sur le sol. Pour passer d'une boucle à une autre, la végétation plus septentrionale a dû céder sa place, victime de chablis, de feux ou d'épidémies, ces deux derniers phénomènes étant souvent suivis du chablis avec les effets sur les sols dont on vient de voir un aperçu.

À l'intérieur des grandes boucles se dessine aussi un boudin de petites boucles qui représentent les successions de stades appartenant à une même série évolutive. Dans ces dernières, le sol continue d'évoluer sous l'action combinée d'un même climat et des différentes végétations pionnières, transitoires et climaciques qui s'y succèdent. Cette évolution, à l'intérieur d'une même série évolutive, sous un climat quasi constant (avec quand même quelques petites oscillations), décrit donc également des spirales à l'intérieur des grandes boucles. Car le sol continue d'évoluer à partir du stade où l'a laissé la végétation précédente. L'interaction de cette végétation et du climat continue de se conjuguer

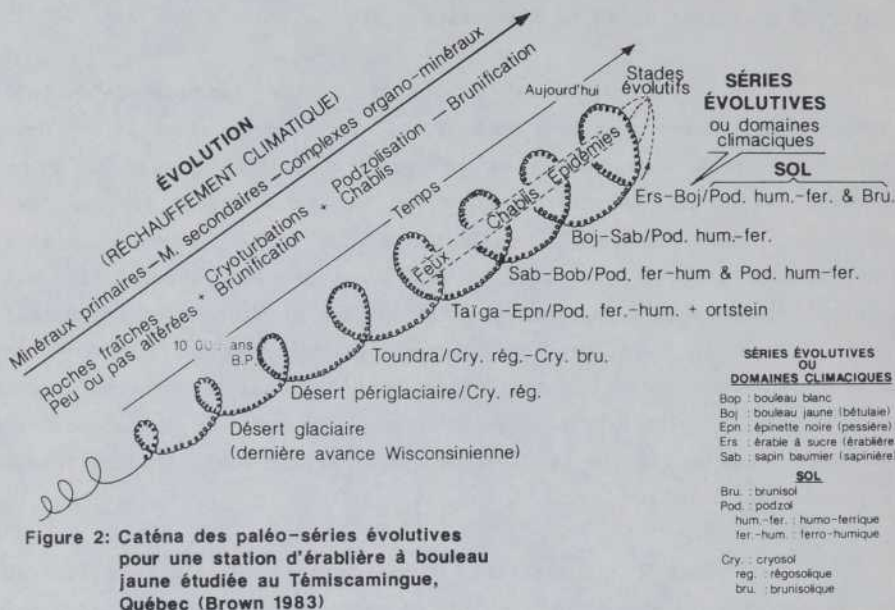


Figure 2: Caténa des paléo-séries évolutives pour une station d'érablière à bouleau jaune étudiée au Témiscamingue, Québec (Brown 1983)

pour ajouter ses effets aux profils hérités des écosystèmes précédents; localement, pour les profils récemment perturbés par les chablis, les animaux, les cycles gel-dégel..., elle s'exprime, comme nous l'avons vu, sur des roches-mères constituées de matériaux plus ou moins évolués provenant de différentes parties du solum, voire du régolithe peu ou pas encore pédogénétiquement altéré.

Cette perpétuelle évolution du sol, avec la complexité des facteurs en cause, est donc responsable de sa grande variabilité et des difficultés rencontrées par le pédologue qui tente de l'étudier, de l'échantillonner, de le décrire, de le classifier et de le cartographier. Le micro-relief trahit l'existence de ces phénomènes, mais ne réflète que partiellement l'ampleur de la variabilité du sol.

Références

- BROWN, J.-L., 1977. **Étude de la perturbation des horizons du sol par un arbre qui se renverse et de son impact sur la pédogénèse.** Can. J. Soil Sci. 57: 173-186.
- BROWN, J.-L., 1979. **Étude systématique de la variabilité d'un sol podzolique, le long d'une tranchée dans une érablière à bouleau jaune.** Can. J. Soil Sci. 59: 131-146.
- BROWN, J.-L., 1981. **Les forêts du Témiscamingue, Québec. Écologie et photo-interprétation.** Lab. écologie forestière, Univ. Laval, Québec. 447 p.
- BROWN, J.-L., 1983. **De la variabilité du sol. Sa nature, ses causes, son ampleur et ses conséquences pratiques.** Univ. Laval, thèse de Ph. D., 104 p.
- BROWN, J.-L. et MARTEL, Y. 1981. **Intérêt des chablis dans l'étude des paléosols.** Géogr. phys. Quat. 35: 87-92.
- DWYER, L.M. et MERRIAM, G. 1981. **Influence of topographic heterogeneity ou deciduous litter decomposition.** Oikos 37: 228-237.
- HART, G, LEONARD, R.E. et PIERCE, R.S. 1962. **Leaf fall, humus depth, and soil frost in a northern hardwood forest.** Forest research note no 131, Northeastern For. Exp. Sta. U.S. Dept of Agriculture. 3p.
- McFEE, W.W. et STONE, E.L., 1965. **Quantity, distribution, and variability of organic matter and nutrients in a forest podzol in New York.** Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30: 432-435.
- PAGÉ, F., 1983. **Caractérisation d'horizons B - podzoliques du Québec par le fer et l'aluminium extraits au dithionite-citrate-bicarbonate, à l'oxalate acide d'ammonium, au pyrophosphate de sodium et au tétra-borate hydroxyde de sodium.** Rapport d'activités 1982-83. Service de la recherche en sols. MAPAQ. p. 88-98.

RICHARD, P., 1977. **Végétation tardiglaciaire au Québec méridional et implications paléoclimatiques.** Géogr. phys. Quat. 31: 161-176.

RICHARD, P., 1978. **Histoire tardiglaciaire et post-glaciaire de la végétation au mont Shefford, Québec.** Géogr. phys. Quat., 32: 81-93.

L'EVOLUTION DES CRITERES DIAGNOSTIQUES DES SOLS PODZOLIQUES
DANS LA CLASSIFICATION CANADIENNE DES SOLS

R.W. Baril* et J.A. McKeague**

Résumé

Les premiers travaux d'inventaire des sols (soil survey) débutèrent au Canada en 1914. J.H. Ellis proposa, en 1932, un système de classification des sols basé sur le découpage des terrains en zones, combinaisons et associations de sols. Seul l'Ouest du Canada fut fidèle à ce système tandis que le Québec et l'Ontario adoptèrent le système américain, notamment le concept de la série de sol. Partout dans les catégories supérieures on utilisa les concepts de l'Ecole russe de Dokuchaïev. Ce n'est qu'en 1955, à l'instar des Américains, que les Canadiens s'éloignèrent de certains concepts russes pour adopter un système taxonomique qui s'appuie plus sur les propriétés des sols que sur des concepts de genèse. Les travaux actuels de cartographie des sols portent sur une définition "statistique" des unités de sols en vue d'une meilleure utilisation. Les études fondamentales en genèse des sols sont nécessaires pour faire progresser la connaissance des sols.

*Professeur émérite, Département des Sols. F.S.A.A. Université Laval.
Adresse: 2782, rue Louisbourg, Sainte-Foy, Canada G1W 1W6

**Institut de Recherche sur les Terres, Agriculture Canada, Ferme
Expérimentale Centrale, Ottawa, Canada K1A 0C6

INTRODUCTION

Qu'est-ce qu'un sol podzolique ou un "Podzol"? Question difficile à répondre si l'on considère que les concepts associés à la définition des podzols ont évolué sans cesse. Depuis 1978, cependant, un pédon (unité de sol au champ) de nature podzolique a été défini comme étant celui qui possède parmi ses horizons un horizon dit "podzolique". Il ne doit pas avoir d'horizon enrichi en argile silicatée (Bt) à moins de 50 cm de la surface minérale. Il ne doit pas présenter de couche organique en surface dont l'épaisseur excède 60 cm dans le cas de matériaux fibriques ou 40 cm dans les cas des matériaux mésiques ou humiques. De plus, le pédon n'a pas de couche de pergélisol à moins de 1 m si les signes de cryoturbation sont peu évidents ou à moins de 2 m de la surface si le sol montre des signes très évidents de cryoturbation. L'ensemble des critères du B podzolique est donc plutôt complexe (tableau 1). Comment en est-on arrivé à établir des critères si spécifiques et même impossibles à vérifier sur le terrain? L'objectif de ce travail est de répondre à cette question. Les auteurs feront l'historique de l'évolution des concepts et des critères utilisés pour la classification taxonomique des sols podzoliques du Canada. Ils discuteront à partir des concepts utilisés actuellement en classification (taxonomie) des sols, l'orientation de la taxonomie en tenant compte de l'évolution mondiale dans ce domaine.

Tableau 1. Critères pour l'horizon B podzolique (C.C.P., 1978).

Morphologiques

1. Épaisseur ≥ 10 cm
2. Couleur
 - a) noir, ou 7.5 YR ou plus rouge, ou 10 YR devenant plus jaune en profondeur;
 - b) saturation de couleur > 3 , ou luminosité ≤ 3
3. Matériaux amorphes
 - a) enrobements bruns à noirs sur des particules, ou microagrégats bruns à noirs;
 - b) le matériel semble limoneux, à moins qu'il ne soit cimenté
4. Texture plus grossière que l'argile.

Chimiques

Il existe 2 sortes d'horizons B podzoliques

1. Bh, teneur en Fe très basse: > 10 cm d'épaisseur, $> 1\%$ C organique, $< 0.3\%$ Fe extractible au pyrophosphate, (Fe_p), un rapport C organique sur $Fe_p \geq 20$.
 2. Bhf ou Bf, teneur appréciable en Fe: > 10 cm d'épaisseur, $> 0.5\%$ C organique, $\geq 0.6\%$ (0.4% pour les sables) d'Al + Fe extractibles au pyrophosphate ($Fe_p + Al_p$); rapport $Al_p + Fe_p$ sur argile ≥ 0.05 ; $Fe_p \geq 0.3\%$ ou rapport C organique sur $Fe_p < 20$, ou tous les deux.
-

Les premières années, 1914 à 1940

Au début de la cartographie des sols au Canada en 1914, le système de classification utilisé en Ontario était basé sur la géologie des matériaux du sol (McKeague et Stobbe 1978). On ne reconnaissait pas l'importance des profils de sols dit "génétiques". Le concept de zonalité des sols lié au climat et à la végétation, tel qu'élaboré par Dokuchaev de l'école russe (Glinka 1927 et Simonson 1968), était utilisé par les pionniers de la classification des sols de l'ouest du Canada après 1920. Parmi les classes de sols "zonaux" reconnues au Canada vers 1930, se trouvait le podzol. Avant 1930, la relation existant entre les horizons A2 et B des podzols du nord des Etats-Unis n'était pas reconnue par la plupart des classificateurs (Simonson 1985). Ils croyaient que l'horizon A2 presque blanc était un dépôt de cendres volcaniques. Les pédologues canadiens pensaient probablement de même.

Ellis (1932) formulait le premier, un système canadien de classification des sols. Son système s'inspirait de celui de Nikiforoff des Etats-Unis et était conçu pour la classification des sols sur le terrain. Les types de profils que l'on retrouvait associés sur le terrain étaient classifiés et regroupés en zones, combinaisons et associations. Le podzol était une des classes de niveau catégorique le plus élevé: celui de la zone. Dans la zone des Chernozems du sud du Manitoba il y avait très peu de podzols. La zone des podzols était considérée comme une unité cartographique où le sol "normal" de Dokuchaev (Soil Survey Staff 1960) dominant appartenait au grand groupe zonal podzol. Ce dernier n'était pas défini comme tel mais était inclus dans une zone climatique définie en termes généraux, c'est-à-dire la zone des climats froids et humides de l'est du Canada. Bref, la définition des zones était bien incomplète. A proprement parler ce n'était pas un système taxonomique de classification des sols. Dans une certaine mesure ce système était le précurseur des systèmes écologiques actuels ou à venir. Pour les pédologues peu enclins à la précision, à cette époque, cela leur permettait de classer un sol parmi les podzols ou dans une autre classe. De plus, avec un tel système, il n'était pas possible de faire la corrélation des sols classifiés par des pédologues différents.

1940-1945, au Québec

Durant la période de guerre des années 1939-1945, un fait particulier s'est produit au Québec et mérite d'être rapporté à cause de son incidence sur l'évolution et le choix d'un système de classification des sols au Québec. En effet, le Gouvernement du Québec charge le Ministère de l'Agriculture d'implanter le plus rapidement possible la culture de la betterave à sucre. Le premier directeur-gérant de la raffinerie de sucre de St-Hilaire, qui vient des Etats-Unis, insiste auprès du Gouvernement du Québec pour que l'on entreprenne sans tarder la cartographie des sols de la Plaine de Montréal; c'est ce qui donnera un second souffle de vie à la pédologie et à la cartographie des sols au Québec (Baril 1985). On utilise pour la première fois le système de classification des sols incluant les séries, les types et les phases, tel que préconisé dans le système américain et résumé dans "Yearbook of Agriculture" (USDA 1938). Le Ministère de l'Agriculture du Québec publia entre 1941 et 1944 les sept premières cartes pédologiques de comté accompagnées de légendes et de notices explicatives sur les sols de la Plaine de Montréal. L'utilisation du système américain de classification des sols fut présentée par Baril (1943) dans le cadre de la réunion annuelle de l'ACFAS. Ce système qui continuera d'être utilisé par la suite au Québec ne sera pas sans causer une certaine gêne à certains pédologues d'Ottawa et de l'Ouest canadien qui préconiseront comme nous le verrons par la suite un autre système de classification, soit une version amendée du système utilisé plus tôt par le professeur Ellis du Manitoba.

1945 à 1955

En 1945, le jour même de l'annonce de la fin de la deuxième grande guerre mondiale, débutait à Ottawa le premier Congrès National canadien de classification des sols, avec comme vice-président le grand pédologue Charles E. Kellogg, directeur du Soil Conservation Service des Etats-Unis. Si l'on mentionne cette anecdote, c'est pour souligner qu'un système de classification des sols a très peu de valeur s'il n'est pas utilisé par tous les pédologues sur un territoire aussi vaste que possible, tel le Canada, et même le monde entier.

A ce premier congrès de la Commission Nationale de classification des sols, en 1945, Stobbe (1945) proposa une version amendée du système de classification des sols d'Ellis dont il a été question précédemment. Au niveau 1, le critère de la végétation était la base, exemples: toundra, forêt, prairie; au niveau 2, le critère choisi était celui de la zone, exemples: podzols, chernozems, ce qu'il était convenu d'appeler les "grands groupes génétiques" qui correspondaient à peu de chose près aux types de sols génétiques des Russes. Le Québec par la voie de son représentant s'objecta à l'utilisation de ce système et fut suivi par l'Ontario. Ces deux provinces continuèrent à utiliser le système américain de classification des sols avec les séries, les types et les phases comme unités inférieures du système, tandis que les provinces de l'ouest du Canada utilisaient les associations du système d'Ellis, qui subira d'ailleurs plusieurs amendements. Au cours de ce congrès des discussions fort véhémentes sur le choix du meilleur système de classification des sols eurent lieu entre les deux protagonistes, le Dr Kellogg et le professeur Ellis, et ce, au grand plaisir des jeunes pédologues que nous étions. Suite à ce congrès, l'adoption d'un système officiel de classification des sols pour le Canada n'eut pas lieu et il faudra attendre jusqu'en 1970 pour qu'un système officiel soit adopté.

Le but principal de la classification des sols tel qu'exprimé lors du premier congrès de 1945 et réaffirmé par la Commission canadienne de pédologie (1978), était le suivant: "Organiser les connaissances sur les sols pour qu'elles puissent être rappelées systématiquement et propagées, afin d'établir les relations entre les différents sols, entre leurs propriétés, les facteurs environnants, et aussi leurs possibilités pour diverses utilisations". Ajoutons que pour réaliser un tel objectif, il faut que le système de classification soit basé sur les propriétés mêmes des sols qui peuvent être mesurées; ce qui n'empêche pas, bien au contraire, de choisir de préférence des propriétés qui possèdent une connotation génétique. Dans le système d'Ellis les classes toundra, forêt, prairie, dans la catégorie la plus élevée, soit la région, étaient basées sur le critère végétation.

1955 à 1970

Stobbe (1955) présenta à la troisième conférence de la Commission canadienne de pédologie, le premier système taxonomique canadien dans lequel les classes étaient basées sur les propriétés des sols. A cette époque les Américains en étaient à la quatrième approximation de leur système de classification des sols et les échanges de correspondance avec eux étaient fréquents. Le système américain devait être présenté dans une édition révisée, la Septième Approximation, au Congrès International de la Science du Sol à Madison, Wisconsin en 1960. Dans la catégorie la plus élevée du système canadien figurait la classe des sols podzoliques. Ceux-ci devaient avoir un horizon A2 blanc, éluvial, et un horizon B2, illuvial présentant des accumulations de matière organique ou d'argile. Dans la catégorie immédiatement inférieure, les sols podzoliques étaient subdivisés en deux classes: les sols brun gris et les sols gris ayant tous deux un horizon d'enrichissement en argile. Les trois autres classes comprenaient les podzols humiques, les podzols à orstein et les podzols à orterde. Ils étaient caractérisés par un horizon d'enrichissement en matière organique, en sesquioxides, ou des deux. Il n'y avait aucune définition spécifique des classes comme telles, mais les caractéristiques des classes aux catégories inférieures (séries, associations dans l'ouest du Canada) étaient connues.

Pour les pédologues de 1955, il y avait eu un gros pas de fait, mais ils espéraient être en mesure de mieux faire après le Congrès International de la Science du Sol de 1960. Il subsistait de grandes lacunes dans l'uniformisation de la classification des sols et dans la connaissance des propriétés des sols podzoliques.

La publication de la 7ième Approximation du nouveau système de classification des sols des Etats-Unis (Soil Survey Staff, 1960) devait accélérer le progrès au Canada dans l'adoption des critères plus quantitatifs et plus précis permettant de mieux définir les classes de sols. En 1960, la définition du grand groupe podzol par les Canadiens était encore vague; à l'état vierge (condition qui n'était plus retenue par les Américains), les sols

devaient avoir un horizon organique à la surface (L.F.H.), un horizon éluvial (Ae) clair, et un horizon illuvial (Bf ou Bfh) dans lequel les principaux produits d'accumulation étaient la matière organique et les sesquioxydes (Stobbe 1960). Il n'y avait pas de méthode sûre de vérifier le taux d'accumulation des sesquioxydes. Certains pédologues croyaient qu'une quantité d'au moins 0.5% de Fe_2O_3 extractible au dithionite de sodium était suffisante. L'inclusion dans les podzols gleyifiés de sols gleysoliques avec un horizon d'accumulation d'oxydes de fer est sans doute à l'origine de cette idée (Tableau 2) (Wicklund et Richards 1962, McKeague 1965, McKeague et Day 1966). Il est à noter que l'absence de critères ou de critères bien définis entraînait un manque d'uniformité.

Bruce Cann, corrélateur national, a cherché en vain des critères morphologiques pour différencier les podzols des autres classes de sols. A cette fin, il a analysé en détail les descriptions de nombreux profils. Les propriétés morphologiques telles la couleur, l'épaisseur et la séquence des horizons ne permirent pas de trouver de critères satisfaisants de différenciation pour identifier les vrais podzols des autres sortes de sols. Il s'y trouvait des podzols sans horizons Ae et des horizons B podzoliques de diverses couleurs: noir, rouge, brunâtre, jaunâtre et toute la gamme de teintes intermédiaires.

Les nouveaux critères de définition de l'horizon B dit podzolique

McKeague et Day (1966) ont été les premiers à définir l'horizon B podzolique d'après les quantités d'Al et de Fe extractibles à l'oxalate acide d'ammonium. Tam (Lundblad 1934) et Lajoie et DeLong (1945) avaient montré bien auparavant l'efficacité de l'oxalate acide d'ammonium pour l'extraction de Fe et Al des horizons B des podzols. Il est malheureux que ces derniers chercheurs québécois n'aient pas poussé leurs recherches jusqu'à l'étude comparative des horizons B des autres classes de sols. Il a fallu attendre vingt-et-un ans après le travail de Lajoie et DeLong avant que les chercheurs McKeague et Day (1966) ne proposent une définition quantitative des horizons B dits "podzoliques". En effet, ils ont trouvé,

Tableau 2. Propriétés d'un pédon de la série de St-Samuel¹

Horizon	Prof. cm	Couleur (humide)	M.O. %	sable	limon %	argile	Dithionite		Eh mv
							Fe	Al	
LF	1-0		65.0	-	-	-	-	-	-
Ah	0-8	10YR 2/1	8.2	80	11	9	0.3	0.2	300 to 800
Ae ₁ g ₁	8-25	5Y 5/2	0.3	88	8	4	0.5	0.1	- -
Ae ₂ g ₂	25-46	5Y 5/2	0.1	-	-	-	0.7	-	200 to 800
B _g f	46-54	7.5YR 5/6	0.2	81	10	9	2.2	0.1	- -
IIC _g	54-61	5Y 5/2	0.3	34	54	12	0.8	0.1	100 to 750
IIIC _g	61-126	5Y 4/1	0.2	95	3	2	<0.1	<0.1	-200 to + 100

¹Le pédon près d'Ottawa a été étudié par McKeague (1965). Dans le rapport pédologique des comtés Russell et Prescott, Ontario, le sol de St-Samuel est classifié comme podzol gleyifié (Wicklund et Richards 1962). Maintenant il est classifié comme un gleysol luvi-ferrique.

en utilisant l'oxalate acide d'ammonium, que la différence entre les teneurs en (Fe et Al) extractibles par ce réactif dans les horizons B podzoliques et celle de l'horizon C était généralement supérieure à 0.8% et que les sols des autres classes de sols ne rencontraient pas cette limite. Notons que le critère suggéré avait pour but de préciser une certaine différenciation déjà acquise sur ces sols par l'ensemble des pédologues du Canada. Ce critère nouveau ouvrait la voie vers une orientation plus quantitative des critères de diagnostic des sols. Mentionnons que les pédologues de différentes régions du Canada avaient choisi un certain nombre de sols classifiés comme podzols et des sols d'autres classes pour être soumis à l'extraction par l'oxalate acide d'ammonium.

Le besoin de critères précis pour uniformiser la classification des sols au Canada semblait tellement urgent que le critère du B podzolique basé sur l'extraction du Fe et d'Al par l'oxalate fut accepté au Congrès de Québec en 1965 avant même la publication des résultats (Stobbe 1965). Certains pédologues ont réagi fortement à cette décision parce qu'ils appréhendaient que la classification des sols basée sur des critères chimiques déterminés en laboratoire supplante celle basée sur des critères morphologiques établis au champ. Dans la publication officielle de la classification canadienne des sols (Canada Department of Agriculture 1970), la définition de l'ordre podzolique retient le critère basé sur l'extraction du Fe et de l'Al par l'oxalate acide d'ammonium. L'importance de l'accumulation des composés de Fe et d'Al dans l'horizon B des sols podzoliques était reconnue depuis plusieurs années par les Américains (Soil Survey Staff 1960) mais les critères de la définition de leur horizon "podzolique" appelé spodique laissaient à désirer. Ce n'est que plus tard et en s'inspirant des Canadiens qu'ils améliorèrent leur définition des sols podzoliques. Il est à noter que les sols podzoliques des Canadiens comprenaient au début les sols lessivés ayant un horizon B d'accumulation d'argile (Bt). Ce n'est qu'à partir du congrès d'Edmonton (Stobbe 1968) que les pédologues canadiens regroupèrent cette sorte de sols en une nouvelle classe de sols dits "luvisoliques" au niveau le plus élevé, soit l'ordre. A ce dernier niveau, à l'instar des Américains, les Canadiens ont la classe des sols podzoliques (spodosols) et celle des sols luvisoliques (alfisols).

Après 1970

L'établissement de critères spécifiques stimulait la recherche pour vérifier les critères appliqués aux sols de plusieurs régions du Canada, ce qui favorisa l'adoption de meilleurs critères. Ces travaux se poursuivent encore aujourd'hui. Il y a eu, par exemple, plusieurs excursions des membres du Comité Canadien de Pédologie: au Manitoba (Mills 1971), en Saskatchewan (Stonehouse et al 1971); en Alberta (Dumanski 1971); en Colombie Britannique (Luttmerding 1971, Farstad et Sneddon 1971) pour vérifier et évaluer l'applicabilité des critères de classification des sols podzoliques. À titre d'exemple mentionnons les "sandy podzols" de la Saskatchewan, qui, en dépit de leur belle morphologie podzolique finirent par être classifiés parmi les brunisols dystriques (tableau 3). Dans la région humide de l'est du pays, les pédologues appréhendaient moins que ceux de l'ouest l'utilisation de critères chimiques dans la définition des classes. Par ailleurs, plusieurs études sur les sols podzoliques ont démontré que ceux-ci ne répondent pas toujours aux critères chimiques ou morphologiques proposés (McKeague et Cann 1969, De Kimpe 1970, Laflamme et al 1973, Baril et Tran 1977). Ces exceptions ou anomalies nous paraissent normales dans l'établissement d'un système qui se veut pragmatique et basé sur le plus grand nombre de faits possible. Les Américains ont utilisé l'expression "tailored system" pour désigner une telle approche. Des études destinées à évaluer les divers critères pour la séparation des classes se poursuivent (Evans et Wilson 1985). Mentionnons aussi les tests chimiques au champ tel celui d'un pH élevé (10.3 ou plus) que donne généralement une suspension de sol du B podzologique dans le réactif au NaF (Brydon et Day 1970). Les recherches sont également en cours pour trouver les meilleurs tests au champ afin d'identifier les horizons de diagnostic des classes de sols (Schuppli et McKeague 1984).

Les critères de base suggérés par la Commission canadienne des sols pour l'horizon B podzologique sont les suivants:

- Capacité d'échange dépendante du pH (Clark et al 1966);
- Al extrait par l'oxalate (McKeague et Day 1969);

Tableau 3. Propriétés d'un pédon (Pine) sableux du centre-nord de la Saskatchewan¹.

Horizon	Profondeur cm	Couleur (sec)	pH	C org. %	sable %	argile %	Fe ext.			Al ext.		
							d	o	p	d	o	p
Ae	0-12	10YR 6/2	4.6	0.16	95	2	0.04	0.02	-	0.01	0.00	-
Bfj	12-30	10YR 6/5	5.2	0.15	96	2	0.21	0.11	0.03	0.14	0.08	0.04
BC	30-51	10YR 6/4	5.9	0.03	98	1	0.09	0.05	0.01	0.07	0.07	0.02
C1	51-76	2.5Y 7/3	5.8	-	98	1	0.04	0.02	-	0.05	0.04	-
C2	76-91	2.5Y 7/3	5.6	-	98	1	0.05	0.04	-	0.05	0.03	-

¹Pédon du site 6a à 54°48'N 105°15'0 (Stonehouse et al 1971) classifié comme Podzol Humo-Ferrique, orthique en Saskatchewan. Certains chiffres sont arrondis. L'horizon Bfj ne satisfait pas les critères d'un B podzolique d'après le système canadien. Ce sol est maintenant classé comme Brunisol dystrique éluvié.

- Al + Fe extraits au pyrophosphate de sodium à pH 10.0 (McKeague 1967, McKeague et al 1971);
- Fractions du carbone organique (Lowe 1980);
- La couleur des sols (Evans et Cameron 1985);
- Propriétés micromorphologiques (Pagé 1986, communication personnelle).

Certains chercheurs ont mis en évidence les inconvénients à utiliser l'oxalate acide d'ammonium pour la caractérisation du B podzolique sur la plupart des sols du Québec. (Baril et Bitton 1967, 1969) ont démontré que l'oxalate dissolvait les particules fines de magnétite cristalline. Bernier et Carrier (1968) ont fait ressortir le pouvoir dissolvant de l'oxalate acide d'ammonium, utilisé à l'obscurité et à la température de la pièce, sur la biotite et l'olivine. De plus, à l'instar de McKeague et Day (1966), Bernier et Carrier ont démontré sur trois podzols humiques du parc des Laurentides à 65 km au nord de Québec, que le réactif oxalate utilisé comme décrit ci-dessus, s'avérait supérieur aux autres réactifs, notamment le dithionite de Na, pour révéler le degré d'accumulation des composés amorphes du fer et de l'aluminium issus d'altération récente. Une corrélation étroite existait dans les profils analysés entre le fer extrait et le contenu en matière organique. Notons aussi que les cendres volcaniques dans les sols de la Colombie Britannique étaient aussi sensibles à la dissolution par l'oxalate (Farstad et Sneddon 1971).

Le Comité National de Pédologie accepta le rapport de (McKeague et Shields 1973) qui préconisaient les changements suivants dans le choix des critères:

- L'inclusion d'un plus grand nombre de critères morphologiques tels ceux de la couleur, de l'épaisseur et de la texture notamment
- le remplacement du réactif à l'oxalate acide d'ammonium par le pyrophosphate de Na dans le dosage des quantités de Fe et d'Al.

Les critères suggérés et utilisés présentement sont donnés, au tableau 1 (Commission canadienne de Pédologie 1978). La présence d'un horizon

Ae n'est pas requise pour la classification d'un sol podzolique. Les chablis (Brown 1979) et la culture perturbent et mélangent certains horizons Ae. Par ailleurs, d'autres podzols à l'état vierge ne montrent pas d'horizon éluvial Ae (McKeague et al 1978).

L'uniformité dans la classification des sols

L'acceptation des critères morphologiques et chimiques par la Commission Canadienne de Pédologie, a grandement amélioré la connaissance de la genèse et des propriétés des sols podzoliques au Canada. De plus, on constate un net progrès dans l'uniformité de la classification des sols et une stimulation certaine dans la recherche sur les propriétés minéralogiques, physiques, hydriques et sur la matière organique de différentes unités de classification ou séries (phases) de sols. Bref, trente-trois années s'étaient écoulées depuis le premier Congrès National de classification des sols à Ottawa en 1945 et le Comité Canadien de Pédologie (1978) pouvait publier sa deuxième version du système taxonomique des sols du Canada.

La publication du Système canadien de classification des sols dans sa forme actuelle amena la dissolution du Comité Canadien de Pédologie qui fut remplacé à Ottawa par un autre comité dit "d'Experts en prospection pédologique des sols du Canada". Il serait en dehors des cadres de cet article de parler de ce dernier comité mais disons que son but est de garder en veilleuse ou au ralenti l'étude des problèmes taxonomiques pour mettre l'accent sur les activités reliées à la cartographie, à la définition, à l'utilisation et à l'aménagement des différentes unités de classification des sols au champ.

Les critères de diagnostic des classes de sols à l'échelle mondiale

Plusieurs pays se servent présentement de critères de différenciation des sols semblables aux critères canadiens pour les "podzols" (McKeague et al 1978). La recherche consacrée à l'amélioration et à la découverte de meilleurs critères de définition des sols semble susciter plus d'intérêt à l'échelle internationale (Daly 1982, McKeague et al 1983, Holmgren et Yeck 1984, Wang et McKeague 1984). Des problèmes techniques subsistent encore.

Ainsi des particules fines de certains sols restent en suspension dans les extraits de pyrophosphate à pH 10.0 (Ballantyne et al 1980, Jeanroy et Guillet 1981, Schuppli et al 1983). Selon Farmer (1982), des complexes alumineux inorganiques et amorphes se trouvent dans l'horizon B podzolique et il est probable que le processus de podzolisation implique la formation et la migration de complexes aluminosiliciques solubles ou à l'état colloïdal fin. Dans certains horizons de sols podzoliques du Canada, on trouve que la plupart de l'Al amorphe est en liaison avec la silice plutôt qu'avec la matière organique (McKeague et Sprout 1975, Wang et al 1986, Wang et Kodoma 1986) (tableau 4). On peut se demander tout comme Baril et Tran (1977), si l'extractif au pyrophosphate qui favorise la dissolution du Fe et de l'Al associés à la matière organique est vraiment le réactif le plus sélectif des produits d'accumulation dans les horizons B podzoliques: d'où la question...qu'est-ce que la podzolisation? D'après (Bridgeman 1947) ce concept dépend des méthodes utilisées pour le définir. L'utilisation simultanée de plusieurs réactifs ou techniques deviendra-t-elle nécessaire un jour pour mieux différencier les diverses sortes de podzols? La classification des sols à horizons discontinus ou à variabilité cyclique n'est pas encore tout à fait résolue (Brown 1979, Beke et McKeague 1984).

Quoi qu'il en soit et en dépit des difficultés qui subsistent, les pédologues reconnaissent l'utilité des critères chimiques quantitatifs précis pour définir les horizons tel l'horizon B podzolique. Grâce à ces critères, une classification uniforme est devenue une chose possible au Canada. On est conscient que la classification des pédons se fait d'abord au champ mais que celle-ci doit s'appuyer sur certaines analyses en laboratoire. Le pourcentage des pédons examinés devant être soumis à l'analyse en laboratoire reste à déterminer mais il est probable que l'analyse d'un pourcent environ des pédons prélevés serait suffisante. Il a été observé que dans chaque région selon le matériau originel, la végétation et d'autres facteurs, il existe une relation entre les propriétés morphologiques et les propriétés chimiques des horizons dits "de diagnostic" (Evans et Cameron 1985): il devient ainsi possible de cartographier et de classier avec confiance la grande majorité des pédons. Dans certains cas il faudra analyser certains individus-sols situés à la limite d'une classe. Parfois d'autres échantillons devront être analysés pour caractériser les sols d'une région; c'est le cas des sols-repères.

Tableau 4. Propriétés d'un pèdon situé à 115 km au nord de Baie Comeau, Québec¹

Horizon	Profondeur cm	Couleur	C org. %	Sable %	Argile %	Al		Fe		Si	$\frac{Al_o - Al_p}{Si_o}$
						o %	p %	o %	p %	o %	Si _o
LF	10-0	-	29.2	75	2	-	-	-	-	-	-
Ae	0-11	10YR 6.2	0.6	78	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
Bhf	11-15	7.5YR 3/2	5.3	77	6	1.7	1.7	1.6	1.3	0.2	0.0
Bfc	15-21	7.5YR 5/6	2.3	80	4	2.4	0.7	1.3	0.3	0.8	2.1
Bfjc	21-33	10YR 5/6	1.2	83	3	1.5	0.3	0.7	0.1	0.7	1.7
Bfjcj	33-46	2.5YR 5/6	0.3	82	3	0.5	0.1	0.2	0.0	0.2	2.0
BCcj	46-59	2.5Y 4/4	0.1	85	3	0.3	0.1	0.1	0.0	0.2	1.0
Cl	76-110	2.5Y 4/3	0.1	85	2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	1.0

¹Résultats de Wang et al (1986).

O - extractible par oxalate, p - par pyrophosphate. $Al_o - Al_p$ est plus ou moins équivalent à Al inorganique. Le rapport $(Al_o - Al_p)/Si_o$ près de 2 pour les horizons contenant imogolite ou "proto-imogolite allophane" (Farmer 1982).

Pour conclure cette partie disons que la classification des sols est basée sur les concepts que nous nous faisons des individus-sols (Simonson 1968) lesquels reflètent ou englobent notre connaissance des propriétés morphologiques, chimiques et des facteurs de l'environnement; ce qui nous aide à formuler de meilleures hypothèses sur la genèse des sols. L'utilisation de critères quantitatifs plus précis aidera à maintenir plus d'uniformité dans l'application du système de classification. Les critères établis seront modifiés lorsque leur application résultera en une mauvaise classification, selon l'opinion collective des pédologues du Canada. De ce point de vue, les critères complexes (tableau 1) utilisés pour identifier l'horizon B podzolique sont acceptables. Ajoutons que si l'on veut développer un meilleur choix de critères plus universels, on pourrait vérifier ces mêmes critères sur des sols d'autres pays.

Autres bases de systèmes de classification des sols

Jusqu'à maintenant on a parlé uniquement du système canadien de classification des sols. Bien qu'il soit basé sur les mêmes principes que celui des Etats-Unis (Soil Survey Staff 1975), certaines différences sont évidentes: le système canadien garde sa nomenclature génétique, i.e. éluvié, gléyifié, etc. De plus, les sols gleysoliques, solonetziques et cryosoliques (permagel) sont distingués au niveau le plus élevé (ordre) au Canada mais pas aux Etats-Unis; au Canada, plus d'emphase est mise sur les propriétés des horizons superficiels des sols vierges.

En dépit de plusieurs divergences avec le système américain, les classes de sols du système canadien sont généralement établies à partir de propriétés choisies du sol que l'on peut observer et mesurer. Les propriétés sélectionnées pour définir les horizons diagnostiques des sols des catégories supérieures sont celles qui reflètent la genèse selon les idées ou concepts courants. D'autres ébauches de système de classification ont également été développées.

Mentionnons-en quelques-unes:

1. La classification écologique (Duchaufour 1977): "le choix des critères

retenus aux différents niveaux a été basé sur les processus d'évolution écologique des sols; ... nous n'avons pas séparé dans cette classification, processus évolutifs et caractères, les uns et les autres étant mis simultanément en vedette". La classification écologique du Professeur Duchaufour présente un attrait certain mais elle ne peut pas être considérée comme un système taxonomique des sols. Les processus de pédogénèse qu'il utilise comme critères de différenciation des classes ne peuvent être vus et sont très difficiles sinon impossibles à mesurer par deux observateurs éloignés ou travaillant à des périodes différentes: ce qui empêchera d'atteindre l'uniformité désirée dans la classification. De plus, si l'objectif est aussi d'arriver à des interprétations pratiques, la classification écologique ne peut remplir ce rôle d'une façon adéquate. En outre, l'absence de limites spécifiques entre les classes pose le problème de l'uniformité dans la classification et la nécessité de recourir à un grand nombre de corrélateurs pour maintenir le plus d'uniformité possible dans la classification.

2. La classification génétique climatique (Ivanova et Rozov 1967). Cette classification russe est basée essentiellement sur les zones climatiques et conséquemment très subjective. Le système pousse les pédologues à cartographier le sol zonal dans la zone climatique propice. Sans vouloir trahir trop leurs grands maîtres, les Russes s'orientent progressivement vers une classification plus objective.
3. La classification numérique. Dans le sillage de l'ordinateur vient de surgir l'idée de la "taxonomie numérique" des sols (Nolin 1982). L'idée est semblable à celle avancée par le Service de la Conservation des sols des Etats-Unis, il y a 45 ans (Cline 1977, Simonson 1985) et où l'on utilisait un certain nombre de propriétés ou d'attributs particuliers, notamment la structure et la couleur de la couche de surface pour décrire les sols. Ce système ne constituait qu'un embryon de système de classification. Les classifications numériques sont probablement utiles pour certains objectifs, mais, à notre avis, le cerveau humain demeure encore le meilleur ordinateur pour développer un système de classification des sols. L'équipe pédologique fédérale à Ste-Foy utilise couramment

l'ordinateur pour quantifier les descripteurs pédologiques sur le terrain; ce qui permet de pouvoir définir un individu-sol non pas à partir d'un pédon typique choisi mais sur l'ensemble des pédons examinés. Quoique débordant cet article, le nombre de pédons à examiner et jugé nécessaire peut être établi statistiquement selon la méthode d'Arnold (1979), Drolet (1982) et Wang (1984). L'on rejoint ainsi une idée exprimée par le grand pédologue Cline (1949) il y a plus de trente-cinq années et qui montrait comment définir l'individu central (modal dans le temps) d'une population d'individus-sols. Ajoutons qu'il est d'ores et déjà possible d'établir, avec plus de précision, autant de classifications numériques nécessaires à des fins interprétatives plutôt que taxonomiques.

Il y a sans doute d'autres approches à la classification des sols et il faut continuer à explorer toutes les avenues nouvelles. Nous croyons qu'une classification basée sur les propriétés de sols, de préférence celles qui reflètent la génèse, est la meilleure; c'est ce qui a rendu possible une classification plus uniforme des sols au Canada. Pour plusieurs chercheurs, les classifications taxonomiques sont très arides et peu attrayantes. La recherche et l'utilisation de critères objectifs ont apporté de meilleures connaissances des propriétés des sols et une meilleure compréhension de leur génèse, et ont amélioré les méthodes d'analyses des sols afin d'obtenir des données analytiques comparables.

Avant l'an 2000 on verra sans doute, les scientifiques des différents pays du monde accepter une "taxonomie internationale" des sols basée sur les principes énoncés. Les critères de définition des podzols seront alors, sans doute, plus précis.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Marc R. Laverdière du Département des Sols de la Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Université Laval pour avoir bien voulu réviser le texte et y apporter d'excellentes suggestions.

REFERENCES

- Arnold, R.W. 1979. Strategies for field resource inventories. Agronomy mimeo 79-20, Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, New York. 14853.
- Ballantyne, A.K., Anderson, D.W. et Stonehouse, H.B. 1980. Problems associated with extracting Fe and Al from Saskatchewan soil by pyrophosphate and low speed centrifugation. *Can. J. Soil Sci.*-60: 141-143.
- Baril, R.W. 1943. Cartographie des sols de la Plaine de Montréal, d'après le système américain. *Annales de l'ACFAS*, vol. 9, p. 126.
- Baril, R.W. 1985. Historique de la pédologie, de la classification et de la cartographie des sols au Québec. Dans *Rétrospective de la recherche sur les sols du Québec*. Cahiers de l'ACFAS, no. 37, p. 3-25.
- Baril, R.W. et Bitton, G. 1967. Anomalous values of free iron in some Quebec soils containing magnetite. *Can. J. Soil Sci.* 47: 261.
- Baril, R.W. et Bitton, G. 1969. Teneurs élevées de fer libre et identification taxonomique de certains sols du Québec contenant de la magnétite. *Can. J. Soil Sci.*, 49: 1-9.
- Baril, R.W. et Tran, T.S. 1977. Etude sur la valeur des critères chimiques proposés par la Commission Pédologique du Canada pour la classification taxonomique des sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* 57: 233-247.
- Beke, G.J. et McKeague, J.A. 1984. Influence of tree windthrow on the properties and classification of selected forested soils from Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 74: 195-207.

- Bernier, B. et Carrier, J.L. 1968. Etude sur l'extraction du fer et de l'aluminium libres dans les sols podzolisés. *Naturaliste Can.*, 95, 247-257.
- Bridgeman, P.W. 1947. *The logic of modern physics*. Macmillan, New York.
- Brown, J.L. 1979. Etudes systématiques de la variabilité d'un sol podzolique, le long d'une tranchée dans une érablière à bouleau jaune. *Can. J. Soil Sci.* 59: 131-146.
- Brydon, J.E. et Day, J.H. 1970. Use of the Fieldes and Perrot sodium fluoride test to distinguish the B horizons of Podzols in the field. *Can. J. Soil Sci.* 50: 35-42.
- Canada Department of Agriculture. 1970. *The system of soil classification for Canada*. Queen's Printer, Ottawa, 249 p.
- Clark, J.S., McKeague, J.A. et Nichol, W.E. 1966. The use of pH-dependent cation-exchange capacity for characterizing the B horizons of Brunisolic and Podzolic soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 161-166.
- Cline, M.G. 1949. Basic principles of soil classification. *Soil Sci.* 67: 81-91.
- Cline, M.G. 1977. Historical highlights in soil genesis, morphology and classification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 250-254.
- Commission Canadienne de Pédologie. 1978. *Le système canadien de classification des sols*. Publ. 1646 du ministère de l'Agriculture du Canada, Ottawa, Approvisionnement et Services Canada. 170 p.
- Daly, B.K. 1982. Identification of podzols and podzolized soils in New Zealand by relative absorbance of oxalate extracts of A and B horizons. *Geoderma* 28: 29-38.

- De Kimpe, C. 1970. Chemical, physical and mineralogical properties of a podzol soil with fragipan derived from glacial till in the province of Quebec: *Can. J. Soil Sci.* 50: 317-330.
- Drolet, J.Y. 1982. Utilisation de transects aléatoires stratifiés pour la caractérisation pédologique de deux pédopaysages dans le comté de Richelieu. Travail non publié mais présenté au 50e congrès de l'ACFAS. Complexe Scientifique, 2700, boul. Einstein, Ste-Foy Québec.
- Duchaufour, P. 1977. Pédogénèse et classification. Masson, Paris.
- Dumanski, J. 1971. Soils with "Podzolic" horizons in the Hinton-Edson area, Alberta. Alberta Inst. of Pedology, Univ. of Alberta, Edmonton 44 p.
- Ellis, J.H. 1932. A field classification of soils for use in soil survey. *Sci. Agr.* 12: 338-345.
- Evans, L.J. et Cameron, B.H. 1985. Color as a criterion for the recognition of podzolic B horizons. *Can. J. Soil Sci.* 66: 363-370.
- Evans, L.J. et Wilson, W.G. 1985. Extractable Fe, Al, Si and C in B horizons of Podzolic and Brunisolic soils from Ontario. *Can. Soc. Soil Sci.* 65: 489-496.
- Farmer, V.C. 1982. Significance of the presence of allophane and imogolite in podzol Bs horizons for podzolization mechanisms: a review. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 28: 571-578.
- Farstad, L. et Sneddon, V.S. 1971. Podzolic tour of western Canada. Vancouver Island Tour. Canada Dept. of Agriculture, Research Station, Vancouver, B.C. 53 p.

- Glinka, K.D. 1927. The great soil groups of the world and their development. (Translation from German by C.F. Marbut). Edwards Brothers, Ann Arbor, Mich. 235 p.
- Holmgren, G.G.S. et Yeck, R.D. 1984. Field identification of spodic horizons with potassium hydroxide extractable aluminum and humic acid color. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1370-1374.
- Ivanova, E.N. et Rozov, N.N. (eds.). 1967. Classification determination of soil types, Nos. 1-5. (Transl. from Russian, 1970). Israel Program Sci. Transl. Jerusalem 271 p.
- Jeanroy, E. et Guillet, B. 1981. The occurrence of suspended ferruginous particles in pyrophosphate extracts of soils. Geoderma 26: 95-105.
- Laflamme, G., Baril, R.W. et De Kimpe, C. 1973. Caractérisation d'un podzol humo-ferrique, luvisolique et lithique à Saint-Esprit, comté de Rimouski, Québec. Can. J. Soil Sci. 53: 145-154.
- Lajoie, P.G. et De Long, W.A. 1945. The acid oxalate extracts of Podzol and podzolic soils. Sci. Agr. 25: 215-220.
- Lowe, L.E. 1980. Humus fraction ratios as a means of discriminating between horizon types. Can. J. Soil Sci. 60: 219-229.
- Lundblad, K. 1934. Studies on Podzols and Brown Forest soils. J. Soil Sci. 37: 137-155.
- Luttmerding, H.A. 1971. Soil profile description and chemical analyses. CSSC (Western) Tour, Fall 1971. Soils Division, B.C. Dept. of Agriculture, Kelowna, B.C.
- McKeague, J.A. 1965. Properties and genesis of three members of the Uplands catena. Can. J. Soil Sci. 45: 63-77.

- McKeague, J.A. 1967. An evaluation of 0.1 M pyrophosphate and pyrophosphadithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in Podzols and some other soils. *Can. J. Soil Sci.* 47: 95-100.
- McKeague, J.A., Brydon, J.E. et Miles, N.M. 1971. Differentiation of forms of extractable Fe and Al in soils. *Soil Sci. Am. Proc.* 35: 33-38.
- McKeague, J.A. et Cann, D.B. 1969. Chemical and physical properties of soils derived from reddish brown materials in the Atlantic provinces. *Can. J. Soil Sci.* 49: 65-78.
- McKeague, J.A. et Day, J.H. 1966. Dithionite - and - oxalate - extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 13-22.
- McKeague, J.A. et Day, J.H. 1969. Oxalate-extractable Al as a criterion for identifying Podzol B horizon. *Can. J. Soil Sci.* 49: 161-166.
- McKeague, J.A., Ross, G.J. et Gamble, D.S. 1978. Properties, criteria of classification and concepts of genesis of Podzolic soils in Canada. pp. 27-60 In *Quaternary Soils*, Geo. Abstracts, Norwich, Eng.
- McKeague, J.A. et Shields, J.A. 1973. pp. 273-293. Report of the Subcommittee on Podzolic soils. Dans J.H. Day and Lajoie, P.C., (eds.). *Proc. 9th Meet. Can. Soil Survey Comm.*, Saskatoon.
- McKeague, J.A. et Sprout, P.N. 1975. Cemented subsoils (duric horizons) in some soils of British Columbia. *Can. J. Soil Sci.* 55: 189-203.
- McKeague, J.A. et Stobbe, P.C. 1978. History of soil survey in Canada 1914-1975. *Historical Series No. 11, Agric. Can.* 30 p.

- McKeague, J.A., Wang, C., Coen, G.M., De Kimpe, C.R., Laverdière, M.R., Evans, L.J., Kloosterman, B. et Green, A.J. 1983. Testing chemical criteria for spodic horizons on Podzolic soils in Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1052-1054.
- Mills, G.F. 1971. Morphological and chemical characteristics of some coarse - to moderately coarse - textured podzolized soils. *Manitoba Soil Survey*. Winnipeg, Man. 57 p.
- Mokma, D.L. 1983. New chemical criteria for defining the spodic horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 972-976.
- Nolin, M. 1982. Utilisation des techniques de l'analyse des multivariabiles à la classification de deux séries de sols développés sur till remanié: les séries St-Sylvère et Dosquet. Thèse de maîtrise, Département des Sols, F.S.A.A., Université Laval.
- Schuppli, P.A. et McKeague, J.A. 1984. Evaluation of some field tests for podzolic B horizons. *Can. J. Soil Sci.* 64: 657-666.
- Schuppli, P.A., Ross, G.J. et McKeague, J.A. 1983. Effects of several centrifugation methods and ultrafiltration on concentrations of iron and aluminum and presence of suspended material in pyrophosphate extracts of soil from tropical and temperate regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1026-1032.
- Simonson, R.W. 1968. Concept of soil. *Adv. Agron.* 20: 1-47.
- Simonson, R.W. 1985. Historical aspects of soil survey and soil classification: Part IV, 1941-1950. *Soil Taxonomy News* No. 10: 1817.
- Soil Survey Staff. 1960. *Soil Classification, a comprehensive system, 7th Approximation*. Soil Conserv. Serv., U.S.D.A., U.S. Gov't Printing Office, Washington, D.C. 503 p.

- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. U.S.D.A. Handbook 436, U.S. Gov't Printing Office, Washington, D.C. 754 p.
- Stobbe, P.C. 1945. The report of the sub-committee on soil classification. pp. 20-41 In: Proceedings of the First Conference of the National Soil Survey Committee. May 7-11, Central Experimental Farm, Ottawa 148 p.
- Stobbe, P.C. 1955. Report of the sub-committee on soil classification. pp. 20-42 In: Report of the Third Conference of the National Soil Survey Committee, Saskatoon, Sask.
- Stobbe, P.C. 1960. Report on the classification of podzolic soils. pp. 20-42 In: Report of the Meeting of the National Soil Survey Committee of Canada. Feb. 22-27, Ontario Agricultural College, Guelph.
- Stobbe, P.C. 1965. Report on the classification of Podzolic soils. pp. 35-50. In: 6th Meet. National Soil Survey Committee of Canada, Québec, Québec.
- Stobbe, P.C. 1968. Report of the sub-committee on the classification of Podzolic soils, pp. 49-56 In: Proc. 7th Meeting National Soil Survey Committee, Edmonton, Canada Dept. of Agriculture, Ottawa.
- Stonehouse, H.B., Acton, D.F. et Ellis, J.G. 1971. Guidebook for a field tour of sandy forested soils in Northern Saskatchewan. Sask. Inst. of Pedology, Publ. M 19, Saskatoon, Sask. 92 p.
- U.S.D.A. 1938. Soils and men. Yearbook of Agriculture. U.S. Government Printing Office. 1232 p.
- Wang, C. 1984. La méthode du transect et son application aux problèmes de la prospection pédologique. Direction générale de la recherche, Institut de recherche sur les terres, Agriculture Canada, Contribution no. 82-02, (4F). Editions française et anglaise disponibles.

- Wang, C. et McKeague, J.A. 1984. Comments on proposed spodic criteria. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 950.
- Wang, C. et Kodama, H. 1986. Pedogenic imogolite in sandy Brunisols of Eastern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 66: 135-143.
- Wang, C., McKeague, J.A. et Kodama, H. 1986. Pedogenic imogolite and soil environments: a case study of Spodosols in Quebec, Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 711-718.
- Wicklund, R.E. et Richards, M.R. 1962. Soil Survey of Russell and Prescott counties. Rept. no. 33, Ontario Soil Survey. Research Branch, Canada Dept. of Agriculture.

CLASSIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES SOLS AU QUEBEC

LAURÉAN TARDIF*

Résumé

L'auteur tente à démontrer que la classification des sols ne saurait être confondue à la cartographie même si elles réfèrent toutes deux aux propriétés des sols, car elles sont deux notions essentiellement distinctes: l'une est d'abord conceptuelle, l'autre est factuelle. La classification est fondée sur le regroupement des objets pris individuellement et selon leurs propriétés intrinsèques. Dans le domaine de la pédologie, l'individu-sol n'existe pas autrement que sous l'aspect d'un concept d'objet naturel et la cartographie réfère à des réalités concrètes et non à un concept qui est une création de l'esprit. Malgré l'effort mis à la description de l'individu-sol, il n'en demeure pas moins qu'on ne réussira pas à changer l'état des choses à savoir que par sa nature, le sol est un continuum, un ensemble d'éléments homogènes dont on ne peut considérer une partie que par abstraction, ce qui ne saurait satisfaire l'approche cartographique essentiellement spatiale résultant en une représentation géographique des sols n'étant pas le propre de la classification.

Donc, l'individu-sol n'existe pas autrement que sous la forme de l'image qu'on s'en fait. En pratique, "le pédologue est obligé de subdiviser intellectuellement ce qu'il sait être des continuums naturels en sous-ensembles spatiaux"¹. De là, l'idée que la classification et la cartographie sont deux notions distinctes.

A l'appui de ces considérations, l'auteur mentionne que les difficultés rencontrées en classification ne sont pas nécessairement les mêmes en cartographie. Par exemple, les problèmes spécifiques à la classification des podzols n'engendrent pas de problèmes cartographiques et vice-versa. En effet, les unités cartographiques ne sont pas

* Service de recherche en sols, MAPAQ, 2700 rue Einstein, Ste-Foy Québec, G1P 3W8.

découpées en fonction d'unités taxonomiques d'un système de classification. L'arbitraire occupe une grande place tant en classification qu'en cartographie des sols et le choix des critères de différenciation appartient au pédologue considérant que la pédologie est une discipline relativement jeune dont les principes relèvent de l'art autant que de la science.

INTRODUCTION

Les problèmes de la classification et de la cartographie des sols peuvent être abordés sous divers aspects. Au Québec, la pédologie est une discipline relativement jeune qui a à peine 50 ans puisque c'est au cours des années 30 qu'on a commencé à s'y intéresser vraiment. Suite à l'action des pionniers tels P.C. Stobbe, J. E. Thériault et A. Scott, la pédologie acquiert ses droits de cité en 1937 avec l'établissement du laboratoire des sols à Sainte-Anne-de-la-Pocatière, lequel devient la division des sols et enfin le service de recherche en sols au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), tel que connu présentement. S'inspirant des concepts de Dokouchaev qui, le premier, a considéré le sol comme un "objet naturel" identifiable suite à l'action des agents de formation sur le matériau originel meuble à la surface de la croûte terrestre, les pédologues ont entrepris la classification et la cartographie qui se sont poursuivies et développées par le travail conjoint des équipes provinciales et fédérales oeuvrant en territoire québécois. La systématique de la classification canadienne et les techniques de terrain ont connu un véritable essor avec le temps². Au cours des années 50, la photographie aérienne fit son apparition et, jumelée à la carte topographique, elle est considérée à juste titre comme un outil de première importance en cartographie des sols bien qu'elle ne soit d'aucun secours en classification.

- La classification, groupement d'individus -

La classification se définit en un groupement des objets selon leurs propriétés intrinsèques. On désigne donc comme étant naturel ou taxonomique tout système de classification comportant des classes (taxons) d'individus identifiés d'après leurs caractéristiques intrin-

sèques mais la difficulté en classification des sols réside essentiellement dans le fait que l'individu-sol n'existe pas autrement que sous l'aspect du concept qu'on s'en fait contrairement à l'individu-animal ou l'individu-végétal qui peuvent être dénombrer et identifier en tant que tel³. En réalité, la complexité vient du fait qu'il s'agit ici d'un continuum. Les individus-sols empiètent les uns sur les autres. Leurs limites sont confuses et arbitraires. De là, la difficulté de regrouper en classes ou en taxons à l'intérieur d'un système de classification des individus qui n'existent pas en réalité si ce n'est sous la forme de l'image qu'on s'en fait, établie de façon arbitraire.

En conséquence, affirmer que les individus sont classés d'après leurs propriétés intrinsèques est une chose; les identifier en est une autre, car l'individu-sol résulte de critères conventionnellement retenus relatifs aux propriétés quantifiables et mesurables au niveau des horizons des profils étudiés, notamment la texture, la structure, la couleur, l'épaisseur, la consistance, la réaction et la composition chimique et minéralogique des matériaux meubles. Autant d'éléments considérés au niveau du pédon constitué de plusieurs profils de sol. Mais il s'agit encore une fois d'un concept pour arriver à désigner l'individu-sol. Le pédon pas plus que la série ou le taxon n'existe en tant que tel. C'est un être de raison, une créature de l'esprit qu'on aimerait bien pouvoir concrétiser. Et la série, regroupement d'un certain nombre de pédons semblables est la catégorie inférieure du système canadien de classification des sols. Elle est le taxon correspondant au plus petit niveau de généralisation. Comme toute abstraction, elle ne se retrouve pas sur le terrain. Au mieux, le pédologue peut observer les profils qui constituent le pédon mais un seul profil de sol ne fait pas un pédon ni une série de sol. On ne peut donc parler de description d'une série en décrivant un profil de sol puisqu'il ne s'agit en fait que d'un profil représentatif de la série, laquelle comporte des variations au niveau des propriétés des individus observées. Par définition, un groupement est l'action de réunir en groupe un ensemble d'individus ayant des caractères en commun. Donc, semblables quant aux critères retenus et respectant l'écart des variations acceptées à l'intérieur d'un même groupe. Selon le niveau de généralisation retenu, les critères de différenciation sont plus ou moins nombreux et les variations admises

plus ou moins grandes. Ainsi par exemple, dans le système canadien de classification des sols, comme pour toute classification naturelle, le groupement au niveau des classes ou catégories supérieures telles les ordres et les grands-groupes est un exercice qui requiert moins d'observations et d'analyses qu'au niveau détaillé de la série faisant appel à un plus grand nombre de critères et de propriétés des sols. Il en résulte donc un degré de précision plus ou moins grand selon le niveau hiérarchique du système de classification.

- L'unité cartographique -

En pratique quelque soit l'image qu'on se fait des sols, le pédologue sur le terrain est face à la réalité et non à des concepts. Il doit procéder de façon intelligente et arbitraire lors de l'identification des unités cartographiques lesquelles diffèrent des unités taxonomiques d'un système de classification. Sur ce point, la pédologie est avant tout un art s'inspirant de principes scientifiques et non une science exacte. Il est donc normal que la présentation cartographique diffère d'un pédologue à un autre. Ici comme en littérature, chacun a son style.

L'unité cartographique ne correspond pas nécessairement à la série taxonomique. Les problèmes de la cartographie sont différents de ceux de la classification. Solutionner les uns ne solutionne pas nécessairement les autres puisque celle-ci est conceptuelle et l'autre est concrète. Leur approche et leur langage sont différents bien qu'elles fassent toutes deux appel à la morphologie. La cartographie ne saurait ignorer les formes de paysage et les phases de terrain qui échappent à la classification pédogénétique⁴. La technique de l'établissement de carte pédologique ne découle pas naturellement d'un système de classification peu importe son raffinement et son degré de perfection. On aura donc beau modifier le système, il demeurera toujours un instrument imparfait comme outil cartographique. Cela tient surtout de la dichotomie entre "sol-continuum" et "sol-individu". De plus, une modification au système de classification n'entraîne pas automatiquement de modification cartographique. L'unité cartographique est d'abord fonction du modelé du terrain et de l'échelle de représentation géographique alors que le taxonomiste s'appuie sur des données analytiques

non disponibles au moment de la délimitation des unités cartographiques et de l'identification des sols lors de la prospection du terrain. Par exemple, il n'y a pas de problèmes spécifiques aux podzols en cartographie comme c'est le cas en classification. Refuser cette réalité serait indubitablement un non sens en pédologie. Lors d'un levé pédologique, la lecture du paysage vient à la rescousse des critères de classification pour l'identification des unités cartographiques à ne pas confondre aux unités ou séries taxonomiques.

- La précision cartographique -

Le levé du terrain en vue de dresser une carte pédologique et de rédiger un rapport explicatif peut être plus ou moins précis. La précision, synonyme de niveau de détail, dépend de l'intensité de la prospection et de l'échelle de la carte. Le terrain est là étendu à vos pieds pour oscultation. A chacun d'ajuster sa cartographie aux variations du paysage incluant la nature du sol, son degré d'évolution, le relief et le drainage car on fonctionne surtout par caténa de drainage. Peu importe l'échelle de la carte, on obtiendra une plus grande précision en terrain uniforme qu'en terrain complexe à un même niveau d'intensité de prospection. Très souvent, il est impossible de procéder par des unités cartographiques pures ne comportant qu'une seule série. Il est donc recommandable de procéder par des complexes en identifiant plus d'une série à l'intérieur d'une même unité cartographique. Même pure, l'unité cartographique à cause de l'extension qu'on lui donne et des inclusions qu'elle comporte n'est jamais l'équivalent de l'unité taxonomique d'autant plus que cette dernière ne distingue pas les phases de sols et de terrains telles la texture de l'horizon superficiel, son contenu en matière organique, la réaction, la pierrosité, le relief, etc.

Quelque soit le détail cartographique, on n'arrivera jamais par la symbolisation et la technique cartographique à rendre compte de toutes les propriétés des sols. Aussi, le rapport explicatif est d'une importance primordiale, même si la légende de la carte est détaillée.

- La légende de la carte -

La légende n'est rien d'autre que la description sommaire des sols identifiés par des symboles appropriés à l'intérieur d'une unité

cartographique qui est dite simple ou composée selon qu'elle comporte un ou plusieurs types de sols. Dans les cas d'unité simple, un seul type de sol est identifié. Il occupe au moins 70% de l'unité. Elle est dite composée lorsque plus d'un sol figure dans l'unité. Les unités cartographiques représentent des portions réelles de paysages et ne sont pas automatiquement fondées sur la série telle que conçue à l'origine.

On pourrait croire que les unités siglées par les mêmes symboles sont identiques et répétitives mais ce n'est pas toujours le cas puisqu'elles comportent un certain pourcentage d'inclusion et que la proportion de chaque sol varie sans pour autant influencer l'ordre de priorité. A la légende, il est préférable de s'en tenir aux propriétés des sols sans mentionner la catégorie taxonomique pour en faciliter la lecture aux utilisateurs non initiés à la pédologie. Une fois les propriétés des sols décrites, le taxonomiste finira bien par les grouper dans les catégories du système. Cet aspect peut se retrouver au rapport explicatif et non à la légende de la carte dans le but d'en simplifier la présentation et la compréhension aux non-initiés.

Tout ceci pour dire que les problèmes de classification des sols sont différents de ceux de la cartographie et qu'au plan cartographique, il n'y a pas de problèmes particuliers aux sols podzolisés comme c'est le cas en classification.

- Les sols podzolisés -

Pour cadrer avec le thème du colloque, qu'il suffise de mentionner que la grande majorité des sols du Québec sont podzolisés. Ce phénomène est favorisé par les conditions climatiques qui y prévalent: précipitations abondantes et températures froides et humides, et par la présence de matériaux originels naturellement acides et perméables à la grandeur du territoire.

En effet, sauf les dépôts argileux marins des basses-terres du Saint-Laurent et les lacustro-marins des régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Lac Saint-Jean, domaine des gleysols, des luvisols et des régosols, et les matériaux calcaires du sud-ouest des Laurentides et de certaines parties des Appalaches, les sols sableux et les tills acides et perméables qui se retrouvent un peu partout au Québec présentent tous une podzolisation à des degrés divers même si certains ne font pas le

podzol selon les normes du système actuel.

Les matériaux lourds, peu perméables et originellement calcaireux, ont freinés le travail des agents évolutifs des sols à un point tel qu'ils ne font pas le podzol même sous des conditions favorables à la podzolisation. C'est ainsi qu'on parle de sols podzolisés même s'ils ne font pas le podzol tel que décrits au système canadien de classification des sols.

Typiquement, les sols podzolisés se sont formés sur des matériaux acides de texture grossière à moyenne, sous une végétation forestière en climats frais à très froids, humides à perhumides. Ils sont habituellement reconnaissables sur le terrain grâce à leur morphologie. Ils ont généralement des horizons de surface organiques L, F et H mais ils se caractérisent et se différencient surtout par les propriétés de leurs horizons B. Leurs propriétés tiennent à la fois de la morphologie et du chimisme du sol.

Des directives émises³ pour les distinguer des autres ordres avec lesquels ils pourraient être confondus, on note qu'ils jouissent d'un préjugé favorable. Par exemple, la présence d'un Bt à une profondeur supérieure à 50 cm n'en fait pas un luvisol; un horizon B podzologique a préséance sur les caractéristiques de gleyification spécifiées aux gley-soliques.

Bien que la présence d'un horizon Bgf caractérise le gleysol ferrique, en pratique, on a tendance à ranger dans les podzols certains sols ayant un horizon gleyifié. Suite aux observations sur le terrain et aux relations connues entre la morphologie et un environnement favorable à un B podzologique, certains sols sont rangés dans les podzols à cause de leurs propriétés morphologiques même si à l'analyse chimique, ils ne correspondent pas aux normes établies. C'est le cas notamment des sols Grosse-Isle, des Iles-de-la-Madeleine à cause de l'importance de l'horizon B brun rouge foncé résultant de la teneur en carbone plutôt que de l'accumulation de fer.

Conclusion

L'intelligence des faits invite parfois le pédologue à procéder de façon arbitraire en cartographie pour contourner les problèmes de classification pour ainsi déboucher sur des données pratiques. A toutes

fins utiles, l'utilisateur s'intéresse davantage aux propriétés des sols et à leur distribution dans le territoire qu'aux normes de la classification. Celles-ci concernent le pédologue et non l'utilisateur à la recherche de données concrètes descriptives du milieu et symbolisées aux unités cartographiques fondées sur la topographie, le drainage, le mode de dépôt, la nature des matériaux et l'aptitude aux cultures. Le pédologue cartographe conscient de cet état de choses, oriente davantage ses travaux en ce sens et attache une grande importance à l'aspect pratique de ses travaux et à l'interprétation agronomique des résultats.

Il en résulte donc qu'un bon pédologue cartographe n'est pas nécessairement un bon taxonomiste et vice-versa.

Bibliographie

1. Baize, D. Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. Science du sol. no 1980-3 vol. 24, pp. 227-243. Plaisir-France.
2. Baril, R. W. Historique de la pédologie, de la classification et de la cartographie des sols au Québec. Rétrospective de la recherche sur les sols au Québec. pp. 3-24. Les cahiers de l'ACFAS no 37, 1986.
3. Commission canadienne de pédologie, 1978. Le système canadien de classification des sols. Direction de la recherche. Ministère de l'Agriculture du Canada. Publ. 1646, 170 p.
4. Groupe de travail sur les systèmes cartographiques, 1982. Un système de cartographie des sols pour le Canada, révisé. Direction générale de la recherche. Contribution no 142. Agriculture Canada, 98 p.

LE LANGAGE DES SOLS PODZOLISÉS:
POUR UNE NOUVELLE VISION TERMINOLOGIQUE

Camille Laverdière¹

RÉSUMÉ

De tout temps, les écoles pédologiques nationales ont développé un système de classification et de désignation des sols de leur pays, ou du monde, sans trop se soucier de l'intervention de chacune d'elles. A l'instar de la taxonomie végétale ou animale, ou de la météorologie quand il s'agit de baptiser les types de nuages, pourquoi la pédologie ne se donnerait-elle pas un seul système de classification et de désignation des sols dans une langue qui lui soit commune? Pourquoi les sols ne seraient-ils pas classifiés en combinant à la fois les facteurs intrinsèques et environnementaux de leur formation, sans qu'ils s'insèrent à l'intérieur d'une hiérarchie de classes comme pour les être animés?

INTRODUCTION

S'il est un type de sol, original et bien individualisé, qui fait l'unanimité tant sur sa genèse que sur sa désignation, c'est bien le **podzol** ainsi baptisé par les Russes, ou le sol cendré, cendreux, pédonyme établi sur la couleur de l'horizon éluvial ou albique. C'est le **spodosol** (du gr. **spodos**, cendre de bois) des Américains; retenons, pour le moment, que ce type de sol est désigné par l'horizon qui n'est pourtant pas de diagnostic. C'est le **sol podzolisé** des Français, c'est-à-dire celui qui a subi la podzolisation. C'est l'**ordre podzologique** des Canadiens, où s'accolent générique et spécifique; le substantif **podzol** n'existe jamais seul et n'apparaît qu'à un niveau inférieur ou celui du grand groupe (en angl. **great group**), et s'accompagne toujours d'un déterminatif, tel **podzol humique**. Faut-il rappeler qu'en français le plus haut niveau hiérarchique, en pédologie,

¹Département de Géographie, Université de Montréal,
B.P. 6128, succ. A, Montréal, Québec, H3C 3J7.

est la classe, et sa division, la sous-classe; c'est aussi simple que cela. Il faudrait donc dire la **classe des podzols** (Laverdière, 1974, 1980), et non l'**ordre podzologique**, le dernier terme devant être un substantif, non un adjectif.

Les podzols sont des sols zonaux, déjà définis il y a cent ans par l'école russe; ils caractérisent le milieu climatique boréal -- occasionnellement le milieu intertropical, croit-on -- dont la couverture végétale est de résineux à éricacées en particulier, aussi à mousses au sud du 52^e au Québec, soit en Jamésie, à lichens (cladonies) au nord du même parallèle, dont la roche mère est de texture grossière, filtrante, acide. Les profils livrent trois horizons très contrastés par leur couleur, très différenciés par leur morphologie et leurs propriétés: Ah, brun ou noir, d'humus brut ou de mor; Ae, grisâtre, sans structure apparente, à grains très fins; Bh, Bhf ou Bf, brun foncé, de composés organiques et de minéraux amorphes (hydroxydes d'Al et de Fe). Leur évolution se résume ainsi: les matières organiques, hydrosolubles, agressives, dégagées de la litière et du mor, altèrent biochimiquement les silicates par complexolyse: presque rien n'est épargné. Les éléments complexés migrent, laissant un résidu de quartz en Ae, et s'accumulent en partie en B, noir ou humifère, rouille ou sesquioxydé, ou prennent la direction des cours d'eau pour le reste.

ANOMALIES ET CONTRADICTIONS

Comment dit-on la réalité podzologique? Remarquons d'abord que le terme **podzol** qui désigne tout le profil, ne s'en rapporte pas moins qu'à un seul horizon que l'on pourrait dire de diagnostic bien avant la lettre, soit l'horizon éluvial, et le terme **spodosol**, au même horizon Ae. Pourtant, le qualificatif **spodique** qui en découle et qui permet de définir ce sol pour les Américains, s'applique cette fois à l'horizon illuvial qui est coloré, non à l'horizon éluvial tel qu'il le laisse entendre! Il y a ici anomalie ou contradiction.

Que retient-on à la Commission canadienne de pédologie (1978) pour désigner les sous-classes (en angl. **great groups**), si ce n'est, à l'exemple du Soil Survey Staff (1975) américain, ce seul horizon B chez les podzols

ainsi appelé **humique** (< 1% de C organique), **ferro-humique** (5%) et **humo-ferrique** (0,5% à 5%) -- constatons qu'il n'y a pas de rapport entre la terminologie de désignation décroissante quant au contenu du C organique, et les pourcentages de cette matière! Néanmoins, l'horizon B est aussi désigné **podzolique**, à condition qu'il ait plus de 10 cm d'épaisseur! Or, l'horizon supérieur, ignoré, n'est pas moins important, car tout est interdépendant dans la genèse des podzols, ou de tous les types de sols².

Aux Etats-Unis (Soil Survey Staff, 1975), les sous-classes sont: les **aquods** (od tiré de *spodosol*, et du lat. *aqua*, eau), les **ferrods**³ (du lat. *ferrum*, fer), les **humods** (du lat. *humus*, terre) et les **orthods** (du gr. *orthos*, vrai); dans tous ces cas, il s'agit de désignations établies sur le rapport du Fe libre au C. Deux éléments chimiques font donc voir toute leur importance à ce niveau dans l'identification des *spodosols*. Duchaufour (1977, p. 329) dirait: "Par ailleurs, on peut également regretter que la définition de l'ordre (*spodosols*), soit basée exclusivement sur la présence d'un seul horizon de diagnostic, l'horizon *spodique*: cela revient à écarter de cet ordre, tous les *podzols* qui, pour une raison ou pour une autre, n'ont pas d'horizon *spodique* identifiable".

En France (Duchaufour, *op. cit.*), deux sous-classes sont retenues: l'une de **milieu drainé**, l'autre de **milieu hydromorphe**. Dans le premier cas, on distingue trois termes allant du **sol ocre podzolique** au **podzol** en passant par le **sol podzolique**; tout ceci tente de faire voir un "degré de développement du profil qui nous paraît un facteur écologique fondamental" (p. 329). Dans le second cas, d'amont en aval suivant l'écoulement des eaux, on va du **podzol humique hydromorphe** (appauvri en Fe), au **podzol humique à concrétions** (intermédiaire), au **podzol ferrugineux à alios durci** (précipitation du Fe). Dans cette conception, l'accent est mis sur la dynamique de formation de ces sols.

²Le responsable du présent colloque, Fernand Pagé (1986), préférerait désigner ainsi l'horizon B de diagnostic: **humique, humo-ocrique et ocrique**.

³"This suborder is provisional. Ferrods are not known to occur in the United States, but the suborder is provided for use elsewhere. The classification has not been developed" (p. 340).

Tel est l'état de trois classifications à leur seul niveau supérieur; il faudrait procéder de la sorte avec d'autres systèmes afin de mieux dégager ce qui fait tant la force que les faiblesses de chacun d'eux, ce qui constitue en fin de compte leurs points communs. Malgré les diversités plus apparentes que réelles entre les systèmes, un même air de famille s'en dégage.

UNE NOUVELLE TERMINOLOGIE

Un nuage ne constitue pas un système nuageux qui à son tour appartient à la circulation générale atmosphérique, un érable ou une épinette (épicéa) ne constituent pas une forêt, ni une roche une formation rocheuse, ni un pédon, ni un sol une couverture pédologique -- expression qui, en passant, est très lourde. Puisque la forêt est l'érablière ou la pessière, la couverture pédologique ne pourrait-elle pas être la **podzolaie**, la **brunisolaie...**, ou le **spodosolaie**, l'**inceptisolaie...**, ou tout autre suffixe placé après la racine pour former un dérivé, tel **ière**? C'est-à-dire qu'au plus haut niveau de désignation, il faudrait reconnaître une telle étendue de sols, la définir ensuite en fonction de critères ou de facteurs si ce ne sont ceux qui sont à l'origine de son expression. Quant aux étendues de transition (intergrades), ou portant les traits des classes encadrantes, ne pourraient-elles pas être une **bruni-podzolaie**, comme exemple.

Par leur combinaison, les facteurs écologiques confèrent au matériau réceptacle, la roche mère, de nouvelles propriétés, une nouvelle morphologie: sous une lente dynamique mais de longue durée, puissante en fin de compte, prend naissance le visage du sol. La genèse de ce dernier ne devient-elle pas le lieu de sa désignation pédonymique? Ce principe accepté, toute appellation édaphique en découlerait. Ainsi, les régosols et les cryosols du "Système canadien de classification des sols" seraient rejetés; les régosols seraient des sols naissants (Laverdière et Saint-Laurent, 1985) dans les classes soit des podzols, soit des brunisols entre autres, et les cryosols n'indiqueraient qu'un aspect froid, géliturbé, de podzols, d'organosols ou d'autres types de sols. Le froid ne confère en rien des propriétés originales aux sols, ce que la "Soil Taxonomy" américaine a saisi; il ne fait que retarder ou rajeunir leur genèse.

Ainsi défini, le sol ne serait pas tellement une unité à trois dimensions qui s'inscrirait dans le temps, mais plutôt une nappe, très mince dans le cas des podzols, ou un espace situé dans le temps ensuite. La podzolaie par définition ne pourrait être que spatiale, c'est-à-dire boréale avant qu'elle ne soit jamésienne, abitibienne, laurentidienne, finalement de Saint-Jude ou de Saint-Amable..., comme il y en aurait d'intertropicales, floridaines... Ce serait donc des étendues de matériaux meubles, lithiques ou organiques, à la surface d'une lithosphère venant en contact avec les autres sphères de la terre: hydriques, gazeuses, vivantes. Il ne pourrait y avoir deux podzolaies analogues puisqu'il y a toujours un ou des facteurs écologiques qui contribuent, d'espace en espace, à des différenciations significatives.

Un domaine qui a été capable d'utiliser l'adjectif **gris** ou mieux l'expression **couleur de cendre** s'appliquant au type de sol à l'étude, ou encore qui a su tirer la pédonyme **andosol** du nom de la chaîne des Andes, ou bâtir les acronymes **alfisol** (de **al**, aluminium; **f**, fer) ou **entisol** (de **ent**, obtenu de récent), plus encore, qui n'a pas craint de construire **fragiorthod**, **glossaqualf**, **xerofluent** ou **sombritroppent** tout contre les mots **profil** et **horizon**, est capable de se donner une terminologie à son image génétique et écologique; se coupant souvent de la réalité pédologique, les Américains l'ont néanmoins fait dans une logique implacable.

Répetons-le: **profil**, **horizon** que personne ne voudrait écarter de son langage, s'inscrit avec bonheur dans la lignée de tous ces termes qui disent la **glèbe** ou la **motte d'argile**, la **glaise**, le **limon**, le **grain de sable** le **terreau** ou l'**humus** qui conduit aux **champs** et à ses **emblavures**, aux **pages** quand il y a, tout à côté, **pédons**, **pédodes** et **pédômes**, **climons** et **bions**... (Boulaïne, 1980) tout aussi justifiés.

Une pédologie repensée, écologique et nymique, n'est-elle pas capable de s'inscrire, dans ses niveaux qui ne se doivent pas d'être nécessairement hiérarchiques, dans autre chose que les classes et les sous-classes, ou les ordres et les sous-ordres, les **groupes** et les sous-groupes, les familles et les séries, plus loin les phases? Ne peut-elle remplacer, s'il y a lieu, cette structure pyramidale d'intégration pas toujours justifiée? Nous ne

sommes ni en systématique animale, ni végétale. S'il y avait les provinces, les zones, les aires a-t-on déjà proposé (Fridland, dans Boulaine, 1980, p. 115). Pourquoi faut-il nécessairement à un sol passer de la classe à la sous-classe, du groupe au sous-groupe puis à la famille avant d'aboutir à la série? Qu'est-ce qui justifie ce long cheminement? Comment un podzol et un organosol, que rien ne rattache, peuvent-ils être soumis à un même parcours? Sans compter que d'une classification à une autre, les niveaux sont souvent décalés, ou ne trouvent tout simplement aucune correspondance, surtout s'il s'agit d'établir la comparaison avec la classification américaine. Au niveau de la série qui répond aussi à une notion d'échelle, pourquoi faut-il que le sol se coupe de tout ce qui le coiffe aux niveaux supérieurs en oubliant ainsi tout de ses origines? On lui procure une appellation courte ou vernaculaire, on le baptise de série de Saint-Jude ou de Sainte-Rosalie, pédotoponymes qui correspondent l'un à un podzol, l'autre à un gleysol. Pourquoi ne pas reconnaître aux sols identifiés leur genèse en disant que l'un est le podzol de Saint-Amable, l'autre le gleysol de Sainte-Rosalie, appartenant respectivement à une podzolaie et à une gleysolaie nécessairement plus étendues? Nous aurions ainsi génériques et spécifiques accolés comme dans tous les autres domaines choronymiques. Enfin, pourquoi faut-il qu'au plus haut niveau de la classification, moins d'observations de terrain ou écologiques sont requises, tandis qu'au bas, tellement plus?

Aux sols définis génétiquement avant qu'ils ne le soient géographiquement, puisque nous avons affaire à une répartition dans l'espace, viendrait la vision globale du profil, non celle d'un horizon et dans cet horizon d'un élément, de deux... tels le fer ou l'humus. Pagé (1986) a fait voir la place que l'on croyait significative accordée à un tel élément dans la désignation non seulement d'un horizon, mais de tout le profil. Et dire que l'on s'entêtait, jusqu'à maintenant, à dire le sol à travers quelques éléments chimiques et non pas à travers les facteurs du milieu qui sont responsables de sa physionomie et de ses propriétés. Il serait plus que souhaitable que l'on fréquente les pédologues d'autres écoles, que l'on se mette à leur écoute.

Dans la nomenclature taxonomique binaire latine, *Homo sapiens*, *Felix*

catus ou **Picea mariana** font l'entendement. En météorologie, les nuages ne sont-ils pas ainsi nommés: **Cirrus filusus**, **Altostratus opacus** ou **Stratocumulus vesperalis**. Pourquoi les organosolaies jamésiennes ou les podzolaies saguenéennes n'auraient-elles pas leur désignation latine? Par l'utilisation d'une telle langue, songeons au précieux rapprochement des pédologues de toute nationalité...

BIBLIOGRAPHIE

- Boulaine, J. 1980. *Pédologie appliquée*. Masson, Paris, XV, 220 p.
- Commission canadienne de pédologie. 1978. *Le système canadien de classification des sols*. Ottawa, min. Agr., publ. 1646, 170 p.
- Duchaufour, P. 1977. *Pédologie: 1, Pédogenèse et classification*. Paris, Masson, XVI, 477 p.
- Fridland, V.M. 1976. Levels of organisation of the soil mantle and regularities of soil geography. Moscou, Congrès intern. de géogr. (Référence donnée dans Boulaine; voir ci-haut).
- Laverdière, C. 1974. Compte rendu des Proceedings of the Ninth Meeting of the Canada Soil Survey Committee de J.H. Day et P.-C. Lajoie, éd. Rev. Géogr. Montr., 28: 199-200.
- Laverdière, C. 1980. Compte rendu du Système canadien de classification des sols de la Commission canadienne de pédologie. Géogr. phys. et Quat., 34: 383-386.
- Laverdière, C. et Saint-Laurent, D. 1985. Pour une intégration des sols non évolués aux différentes divisions des classifications. Ann. ACFAS, Résumés des communications, 52-53: 315.
- Pagé, F. 1986. Nouveaux critères diagnostiques de caractérisation des horizons B podzoliques. Ann. ACFAS, Résumés des communications, 54: 406.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy*. Washington D.C., Soil Cons. Serv., Agriculture Handbook no 436, 754 p.

LES SOLS PODZOLISES SUR LE TERRITOIRE FRANCAIS :
DISTRIBUTION, MORPHOLOGIE, GENESE

D. RIGHI¹, M. JAMAGNE² et O. DUVAL²

INTRODUCTION

Si la podzolisation affecte principalement la zone boréale, elle n'est pas strictement limitée à cette zone climatique. Nous savons aujourd'hui que ce processus peut agir dans toutes les régions humides du globe, en particulier dans le domaine tempéré, mais également dans toute la zone équatoriale où de nombreux exemples ont été décrits (Brabant 1986, Klinge 1968, Schwartz 1986). Cependant, dans ces deux dernières zones climatiques, les sols podzolisés n'y sont jamais généralisés à l'ensemble de la couverture pédologique mais sont, au contraire, localisés sur des sites particuliers.

C'est ce qui apparaît à l'examen d'une carte de répartition des sols podzolisés en France (fig. 1) : les sols podzolisés ne sont pas exceptionnels, mais ils occupent des surfaces de faible extension, disséminées sur l'ensemble du territoire. La région la plus vaste affectée par la podzolisation est celle des Landes de Gascogne ; elle s'étend sur un million d'hectares environ.

Sous le climat tempéré humide de la France, la podzolisation n'apparaît donc que dans des conditions particulières de station. Parmi ces conditions, les propriétés de la roche-mère se sont révélées être les plus importantes (Souchier 1971, 1984).

¹ Université de Poitiers - U.F.R. Sciences - Laboratoire de Pédologie
U.A. 721 du C.N.R.S. - 40, avenue du Recteur Pineau 86022 POITIERS CEDEX

² I.N.R.A. - Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France
ARDON 45160 OLIVET.



- Podzols
□ Sols podzolisés

Figure 1 - Extension et répartition des sols podzolisés sur le territoire français (d'après la carte des sols de France au 1/1.000.000).

De plus, les observations faites à l'occasion des travaux de cartographie pédologique réalisés à des échelles plus grandes amènent à séparer ces sols en trois groupes distincts, les différences portant sur leur morphologie ou sur les facteurs de la genèse. Ces trois groupes comprennent (1) les sols podzolisés sur affleurement sableux (Bassin de Paris, Sologne, Landes) ; (2) les sols podzolisés sur altérites de roches cristallines acides des massifs anciens (Vosges, Massif Central) et, enfin, (3) les sols podzolisés des étages montagnard et subalpin des hautes montagnes (Alpes, Pyrénées). Nous présenterons successivement ces trois groupes en traitant plus en détail, pour chacun, un thème particulier essentiel.

LES SOLS PODZOLISES SUR SABLES QUARTZEUX

Ils sont localisés essentiellement sur les affleurements sableux tertiaires du Bassin de Paris (sables stampiens), les dépôts détritiques de Sologne (sables de Sologne) et les sédiments hydro-éoliens quaternaires des Landes (sables des Landes).

Ils ont en commun de se développer dans des sables quartzeux très purs, extrêmement pauvres en minéraux altérables. Ce sont des sables fins (médiane 0,15 mm, sables stampiens) ou grossiers (médiane 0,30 mm, sables des Landes) dans lesquels la fraction argileuse est pratiquement absente. Ces matériaux homogènes et filtrants favorisent une séparation "chromatographique" des composés mobiles redistribués dans le solum. Il en découle une forte différenciation morphologique du profil dans lequel les horizons sont nettement exprimés et contrastés.

La carte pédologique de la région de Fontainebleau (Horemans 1954) (fig. 2) illustre parfaitement la lithodépendance des sols podzolisés dans le contexte du Bassin de Paris ; ces derniers sont strictement limités aux affleurements et colluvions de sables stampiens alors que les surfaces environnantes recouvertes de formations loessiques limoneuses portent des sols bruns ou des sols lessivés, éventuellement calciques ou hydromorphes selon l'épaisseur du recouvrement et/ou la nature du substrat, calcaire ou argileux.












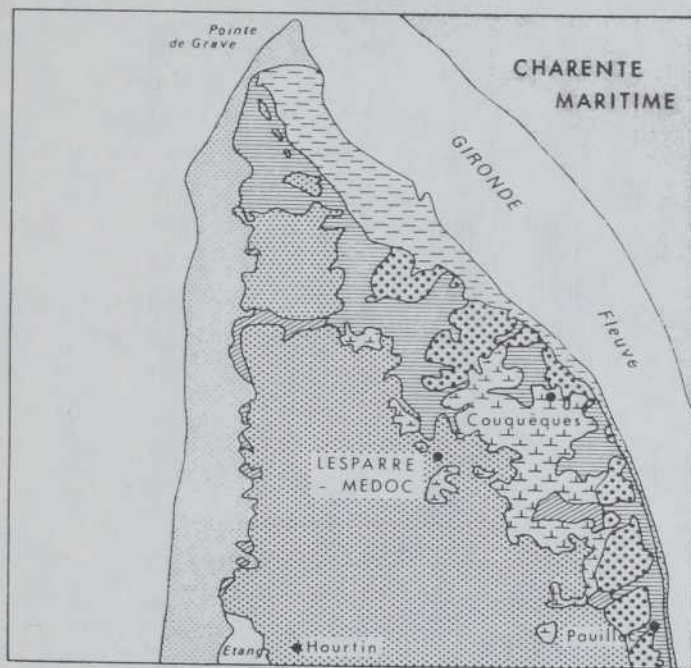
-  Podzols
-  Sols podzoliques
-  Sols lessivés faiblement podzoliques
-  Sols bruns lessivés et lessivés modaux
-  Sols lessivés hydromorphes
-  Sols bruns faiblement lessivés et sols bruns modaux
-  Sols bruns calcaires et rendzines noires
-  Complexe des alluvions anciennes de la Seine
-  Complexe de la meulière de Brie
-  Sols peu différenciés des alluvions récentes

Figure 2 - Extrait de la carte pédologique de France au 1/250.000. Paris.

Le Médoc, extrémité septentrionale de la région des Landes, montre la localisation des podzols sur un ensemble de matériaux quaternaires récents (fig. 3). Les podzols occupent la plaine sableuse médiane couverte de landes ou d'une forêt de pins maritimes mise en place à la fin du siècle dernier. A l'Ouest, sur l'important cordon dunaire, les sols sont minéraux bruts ou peu évolués en raison d'une stabilisation trop récente ou encore incomplète des matériaux. A l'Est, la zone forestière est bordée par des marais sur alluvions marines argileuses et par les restes d'anciennes terrasses de la Garonne. Ce sont des cailloutis (les graves) quartzeux, podzolisés ; ils portent les vignobles des grands crus du Médoc (Wilbert 1978).

L'étude des podzols de la plaine sableuse médiane (Righi 1977) fournit un bel exemple des relations entre sols hydromorphes et podzols et de leur répartition dans le paysage. En effet, l'ensemble de cette zone est affectée par une nappe phréatique superficielle alors que la surface du sol est modelée par l'alternance de microdunes et de microdépressions. La largeur de ces microdunes est de l'ordre d'une dizaine de mètres ; le dénivelé est décimétrique. Ce microrelief a pour effet de placer le sol plus ou moins au-dessus du niveau moyen de la nappe phréatique, d'où une organisation des sols en courtes toposéquences très différenciées qui se répètent très régulièrement sur l'ensemble de la région (fig. 4).

La position du sol par rapport au niveau moyen de la nappe entraîne une variation des conditions pédoclimatiques tout au long de la toposéquence : alternances dessiccation (été) - humidité (hiver) pour la partie la plus élevée, humidité (été) - submersion (hiver) pour la partie la plus basse. Les modalités de l'humification sont modifiées en fonction de ces pédoclimats bien que la couverture végétale reste à peu près identique, la strate herbacée pouvant cependant présenter quelques différences significatives. Il en résulte une podzolisation accentuée sur les microbuttes ; elle diminue d'intensité vers le bas de la séquence. Cette variation de l'intensité de la podzolisation se traduit par des modifications morphologiques : l'horizon A_2 diminue d'épaisseur et disparaît vers le pôle le plus humide ; l'horizon B_{2h} , fortement cimenté au pôle le plus sec, prend une consistance meuble et disparaît également ; un sol hydromorphe remplace alors le podzol dans la microdépression.










-  Sols peu évolués d'apport éolien
-  Sols peu évolués d'apport fluvio-marin ("mattes")
-  Sols hydromorphe peu humifères argileux ("palus")
-  Podzols et sols hydromorphes
-  Sols bruns lessivés et podzols sur alluvions anciennes caillouteuses
-  Sols bruns calcaires et rendzines
-  Tourbes

Figure 3 - Extrait de la carte pédologique de France au 1/100.000. Lesparre.

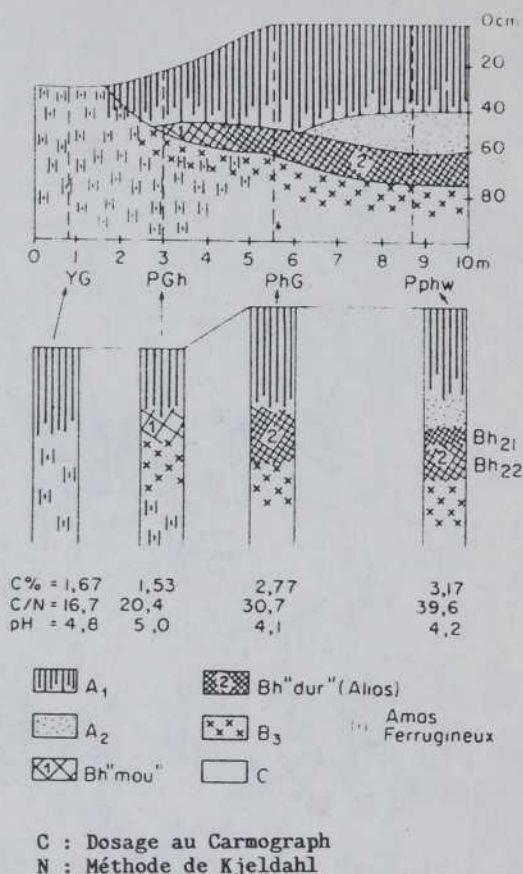


Figure 4 - Microtoposéquence caractéristique des Landes du Médoc.

Les microstructures, en particulier celles des horizons Bh, vont également se modifier. Pour les podzols les plus développés, ce sont des revêtements de matière organique amorphe, très homogènes, formés par l'illuviation des constituants organiques mobiles ; ces revêtements entraînent la cimentation de l'horizon Bh. Pour les podzols moins développés, on observe des microagrégats organo-minéraux, hétérogènes, élaborés par la faune du sol qui réorganise en place la matière organique illuviale, les restes de racines mortes et les éléments fins du squelette.

Ainsi, sur roche-mère sableuse, les revêtements caractérisent une podzolisation accentuée alors que les agrégats caractérisent une podzolisation modérée où l'illuviation organique n'est pas suffisante pour provoquer la cimentation de l'horizon Bh qui reste meuble et accessible à la faune du sol et aux racines.

D'autre part, ces deux microstructures se relaient dans le temps : on observe des revêtements qui recouvrent et fossilisent des restes d'agrégats. Ceci démontre, dans les séquences étudiées, la progression latérale de l'induration des horizons Bh. Elle se manifeste d'abord à l'aplomb des microbuttes, puis gagne latéralement vers les microdépressions jusqu'à une zone où l'illuviation des matières organiques est trop fortement limitée.

Du point de vue géochimique, ces séquences fournissent également un exemple de la divergence des dynamiques du fer et de l'aluminium en relation avec les processus de podzolisation et d'hydromorphie.

Un schéma de la répartition du fer et de l'aluminium montre une accumulation de ces éléments dans deux sites différents de la toposéquence (fig. 5), le fer dans les microdépressions, l'aluminium dans les horizons Bh sous les microbuttes. L'étude des caractéristiques physico-chimiques (pH, Eh) de la nappe et de sa composition chimique (fer et oxygène dissous) aux différentes saisons de l'année explique cette répartition. Le fer est solubilisé (à l'état ferreux et/ou complexé) dans la nappe acide et réductrice ; il migre en suivant le mouvement de celle-ci. En été, lorsque la nappe baisse, les eaux à l'aplomb des microdépressions sont réoxygénées provoquant la précipitation du fer. Ce phénomène ne se produit pas sous les microbuttes à cause d'une épaisseur du sol plus grande, de la présence d'un horizon Bh induré et de l'absence de racines à ce niveau. L'aluminium, quant à lui, est mobilisé à l'état de complexes et suit le mouvement vertical de la matière organique. Fer et aluminium présentent donc deux dynamiques différentes :

- essentiellement latérale et sous l'influence de l'hydromorphie pour le fer ;
- verticale et organique sous la dépendance de la podzolisation pour l'aluminium.

Finalement, les sols des Landes sont organisés en systèmes dans lesquels podzols et sols hydromorphes ne sont pas simplement juxtaposés : les podzols gagnent ou ont gagné latéralement en direction des sols hydromorphes ; des transferts de matière se font entre les deux pôles de la séquence. La description et la compréhension de la couverture pédologique des Landes ne peut donc se faire correctement que par la prise en compte de l'ensemble du système qui n'est pas dissociable.

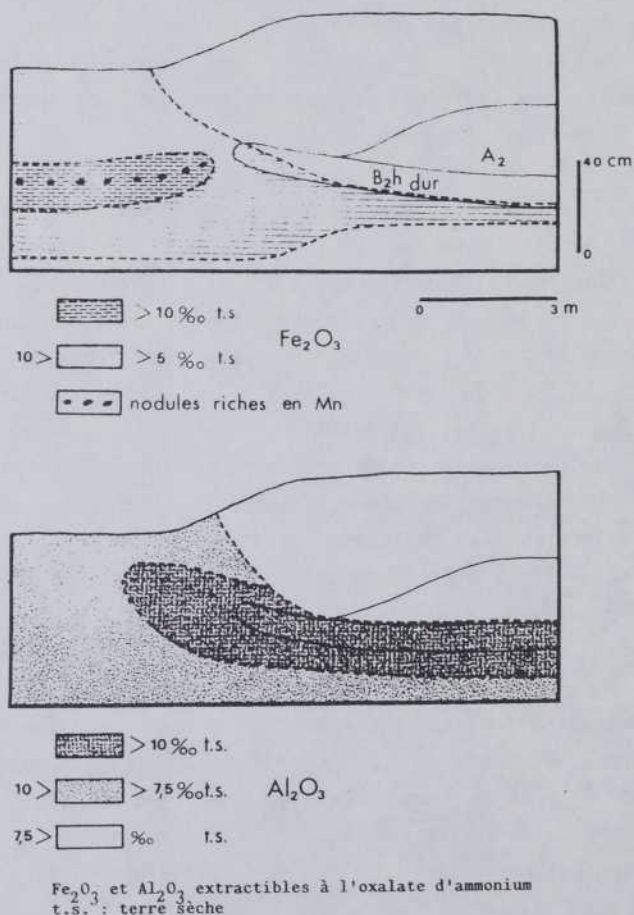


Figure 5 - Répartition du fer et de l'aluminium dans les toposéquences des Landes du Médoc (Righi, 1977).



Figure 6 - Extrait de la carte pédologique de France au 1/100.000.
Saint-Dié.

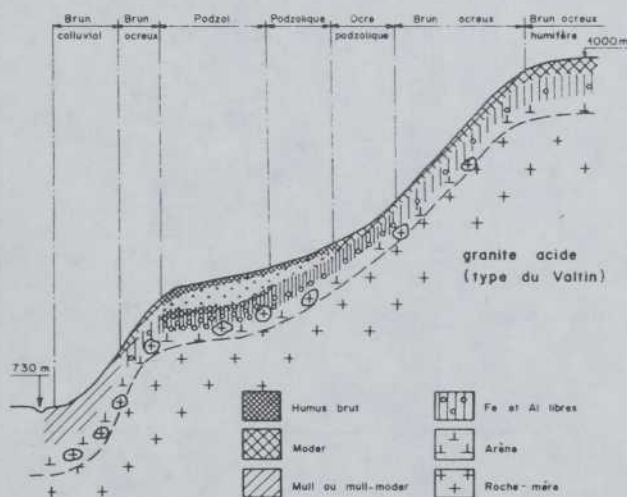
LES SOLS PODZOLISES SUR ALTERITES DE ROCHES CRISTALLINES ACIDES
(VOSGES, MASSIF CENTRAL)

Les altérites des roches granitiques sont le deuxième type de matériaux susceptibles, en France, d'être affectés par la podzolisation. Sur les massifs cristallins anciens des Vosges et du Massif Central et dans ces matériaux, la podzolisation se manifeste principalement aux altitudes supérieures à 800 m ; les conditions climatiques sont alors fraîches (température moyenne annuelle : 8-9°) et humides (précipitations = 1500 mm). La morphologie des profils traduit rarement une podzolisation accentuée (podzols), mais exprime le plus souvent une podzolisation modérée caractérisée par la présence de sols ocre podzoliques.

Dans les Vosges, la carte de Saint Dié (fig. 6) (Bonneau et al. 1978) montre deux zones de sols podzolisés. Ils sont très largement représentés dans la première zone qui correspond aux affleurements de grès vosgiens. L'altération des grès donne un sable quartzeux qui nous ramène, à quelques nuances près, au cas précédent. La seconde zone est celle des Vosges granitiques ; les sols podzolisés y occupent des surfaces plus restreintes. Ils sont limités aux arènes les plus quartzieuses, grossières et filtrantes. De plus, cette répartition est modulée par la topographie : les podzols sont situés sur les replats où l'arène grossière tend à s'accumuler et où la stabilité des matériaux favorise des migrations verticales ainsi que la concentration de constituants provenant de l'amont par migration latérale (fig. 7).

Souchier (1971) a réalisé une étude de l'écologie des sols sur granites. L'intensité de la podzolisation est appréciée à l'aide d'indices (K_{Al} et K_{Fe}) de redistribution de l'aluminium et du fer. La confrontation du classement obtenu avec l'ensemble des paramètres de la pédogenèse fait apparaître que la roche-mère joue un rôle prédominant par sa teneur en fer et en argile (fig. 8). Les podzols ne se développent que dans des matériaux ayant moins de 2 % de fer total (exprimé en Fe_2O_3). Une podzolisation modérée (sols ocre podzoliques) s'installe pour des matériaux dont la teneur en fer total est comprise entre 2 et 4,5 %. Au-delà de cette dernière valeur, la podzolisation cède le pas à la brunification. Ces seuils n'ont une valeur absolue que dans les conditions bioclimatiques de l'étage

montagnard. Ils seront plus bas dans des conditions climatiques moins rigoureuses (région de plaine par exemple). A l'opposé, sous le climat froid et humide des zones boréales, la valeur de ces seuils s'élève si bien qu'ils perdent de leur signification, la podzolisation pouvant affecter tous les types de matériaux. Ce rôle déterminant de la teneur en fer et en argile des roches-mères dans l'orientation de la pédogenèse résulte des interactions matière organique - argile - oxydes de fer. Ces interactions déterminent les modalités de l'humification. Présents en quantité suffisante, les supports minéraux ayant des surfaces actives importantes (phyllites, hydroxydes "amorphes", allophanes) favorisent la précipitation et la polycondensation des acides organiques (composés préhumiques, acides fulviques), agressifs et vecteurs des redistributions d'aluminium et de fer : la podzolisation est inhibée. Les phyllosilicates ferrifères (biotites, chlorites...), particulièrement altérables dans les conditions du sol, sont le plus souvent à l'origine de ces minéraux réactifs, d'où l'importance de la teneur en fer des roches-mères.



Fe et Al "libres" : extractibles au réactif oxalate d'ammonium.

Figure 7 - Toposéquence de sols sur granite dans les Hautes-Vosges.

Libérés en quantité abondante, les constituants amorphes alumineux peuvent également freiner la podzolisation. Sur le Plateau de Millevaches (Ouest du Massif Central), le stade podzol n'est jamais atteint, malgré un climat rigoureux et des roches-mères acides (leucogranites). Les arènes issues de l'altération de ces granites contiennent une quantité importante de gibbsite. Or, la gibbsite est particulièrement instable en présence d'acides organiques complexants (Robert et Veneau 1978, Righi et al. 1982). Son altération libère de l'aluminium et conduit à l'insolubilisation de complexes alumineux particulièrement résistants à la biodégradation, d'où le caractère très humifère des sols et une pédogenèse qui évolue dans l'andosolisation. Des sols intergrades entre andosols et sols podzolisés ont d'ailleurs été décrits dans le Massif Central sur roches volcaniques acides (trachyte, rhyolite) (Hétier 1975), voire sur basalte (Moinereau 1977).

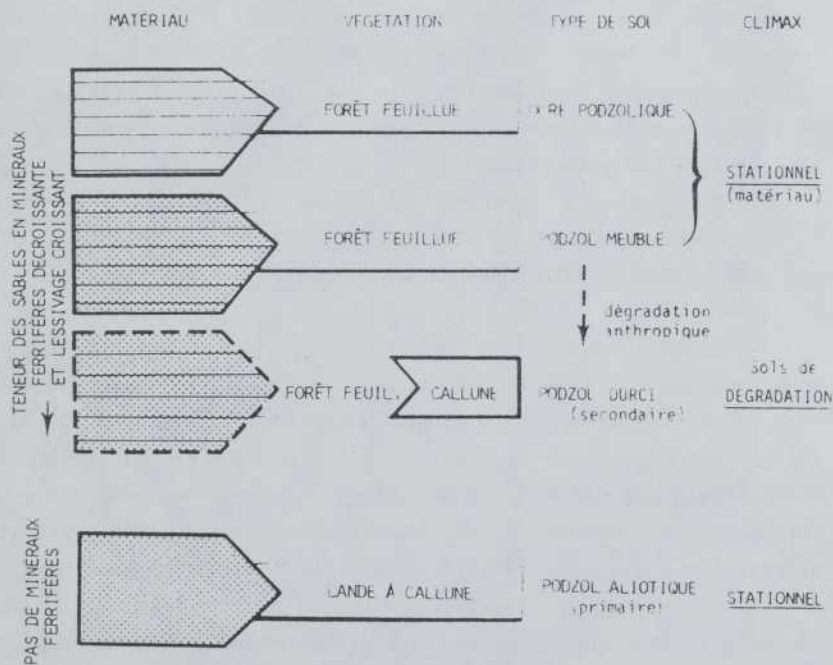


Figure 9 - Teneur en fer des roches-mères, type de végétation et développement de la podzolisation sur sables de Fontainebleau (Robin, 1979)

L'étude des sols podzolisés sur arènes granitiques fait donc apparaître le rôle déterminant de la composition de la roche-mère, les autres facteurs de la pédogenèse, végétation notamment, n'intervenant que secondairement. Ces conclusions se vérifient pour les podzols sur sables sédimentaires. Robin (1979) montre, en effet, que dans les sables de Fontainebleau l'intensité de la podzolisation est déterminée par la nature ferrifère ou non de la fraction argileuse (fig. 9) qui détermine également le type de végétation.

La pauvreté en fer et en argile est une caractéristique de la roche-mère, mais elle peut être également le résultat de l'évolution du sol. Sous climat tempéré atlantique, la pédogenèse des matériaux meubles (sableux, limoneux ou argileux) est dominée par les processus de lessivage d'argile, dégradation des horizons B texturaux et/ou de planosolisation. Ces processus concourent à un appauvrissement très marqué en fer et en argile de la partie supérieure du sol (horizon A₂). Un véritable podzol ou encore un micropodzol peuvent se développer dans ces horizons éluviaux et ceci d'autant plus facilement qu'ils sont plus sableux (Jamagne 1964, De Coninck et Herbillon 1969, Pédro et al. 1978, Baize, 1983), processus dit de podzolisation secondaire.

LES SOLS PODZOLISES DES HAUTES MONTAGNES (ALPES, PYRENEES)

D'un point de vue théorique, les sols podzolisés des hautes montagnes sont comparables à ceux de la zone boréale : ils apparaissent dans la même zone bioclimatique qui est celle de la forêt résineuse. En effet, l'élévation en altitude reproduit globalement la zonation climatique latitudinale (Duchaufour 1984). Cependant, la haute montagne est soumise à l'influence de facteurs spécifiques (pentes, exposition, érosion) qui déterminent une grande variété de milieux d'où une grande diversité des sols à chaque étage bioclimatique. Ainsi la podzolisation est le processus majeur à l'étage subalpin, mais la différenciation morphologique de podzols est sous la dépendance de facteurs stationnels parmi lesquels on peut noter la stabilité du milieu, le degré de fragmentation des matériaux ou la fourniture hydrique (volume d'eau traversant le solum). Cependant, la

lithodépendance est moins marquée dans ces podzols subalpins que dans les podzols de plaine ou des massifs anciens. Leur texture est souvent plus fine (limono-sableuse) et l'on observe la persistance dans l'ensemble du sol de minéraux facilement altérables (chlorites, vermiculites...). Ce caractère les rapproche des podzols boréaux.

Le fonctionnement biogéochimique de ces podzols a été précisé par l'utilisation de minéraux tests (Ranger et Robert 1985) et des mesures lysimétriques et respirométriques (Dambrine 1985).

Les minéraux tests sont des vermiculites de forte capacité d'échange (116 meq/100 g) saturées au baryum et introduites dans le sol à différents niveaux, pour une durée de six mois ou un an. Les transformations minéralogiques et la capacité d'échange sont ensuite réexaminées. La capacité d'échange (CEC) des vermiculites (initialement saturée au baryum) se modifie pour s'équilibrer avec les conditions géochimiques du milieu où elles sont insérées ; en milieu acide et complexant (podzolisation), Ca et Mg, peu sensibles à la complexation, s'accumulent relativement tandis que l'aluminium est éliminé : la CEC ne diminue pas. A l'inverse, en milieu acide non complexant (sols bruns), l'aluminium tend à s'accumuler dans les espaces interfoliaires des vermiculites et perd son caractère échangeable : la CEC diminue fortement et les "îlots" alumineux interfoliaires gênent la fermeture des feuillettes du minéral, phénomène nettement visible par diffraction de rayons X.

Appliquées à un podzol de l'étage subalpin, ces expériences ont donné les résultats suivants (fig. 10) :

- dans les horizons A_0 et A_2 , la CEC reste stable pendant la période hivernale : ce milieu est donc complexant ; après la période d'été, la CEC a diminué et, conjointement, la teneur en Al "libre" a augmenté : ceci révèle un milieu non complexant ;
- dans l'horizon B_s , le milieu reste non complexant en toute saison (diminution de la CEC dès le séjour hivernal).

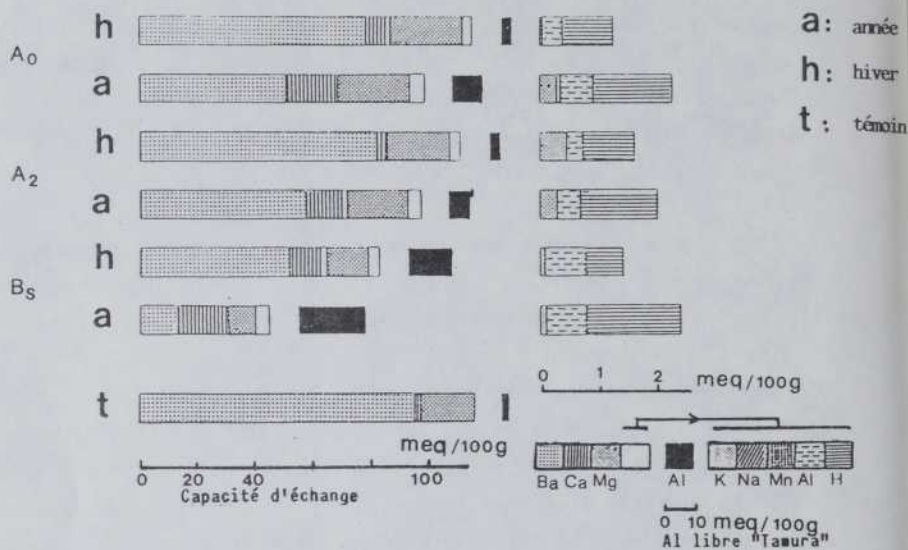


Figure 10 - Capacité d'échange et cations échangeables d'une vermiculite-test avant et après séjours dans un podzol des Alpes (Dambrine 1985).

Le fonctionnement biogéochimique de ce podzol se révèle donc très contrasté au cours de l'année. En hiver, le milieu est biologiquement peu actif, complexant, fortement drainé : la podzolisation est active. La forte activité biologique associée à un flux hydrique moins intense inhibe, au moins partiellement, ce processus pendant la période estivale.

CONCLUSION

La podzolisation est l'un des processus pédogénétiques fondamentaux affectant la surface du globe ; c'est une des raisons pour laquelle les sols podzolisés ont fait et font encore l'objet de nombreux travaux de la part des pédologues français.

Contrairement à ce que l'on observe dans la zone boréale, l'extension des podzols en France, et plus généralement dans la zone tempérée

atlantique, est limitée à des sites particuliers caractérisés essentiellement par une roche-mère quartzeuse, pauvre en minéraux altérables et libérant peu d'argile. Dans les régions de plaine et de basse montagne, la végétation de landes ou de résineux n'est pas le facteur déterminant de la podzolisation bien qu'elle puisse en accentuer l'expression morphologique (Robin 1979).

Au sein de la couverture pédologique, les podzols sont en relation dans l'espace, mais également au cours du temps avec les autres types de sols : ils s'installent dans les matériaux appauvris par d'autres processus comme le lessivage et l'hydromorphie. La podzolisation apparaît alors, pour un grand nombre de matériaux, sous climat tempéré humide, comme le terme de l'évolution pédologique.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize, D. 1983. Les planosols de Champagne humide, pédogenèse et fonctionnement. Thèse Doct. ès Sci., Univ. Nancy I, 285 p.
- Brabant, P. 1986. Les podzols de Kalimantan (Ile de Bornéo). Table Ronde Internationale "Podzols et Podzolisation", Poitiers (à paraître).
- Bonneau, M., Faivre, P., Gury, M., Hétier, J.M., et Le Tacon, F. 1978. Carte pédologique à 1/100.000. Saint-Dié. Notice explicative. INRA, SFSCPF, 159 p.
- Dambrine, E. 1985. Contribution à l'étude de la répartition et du fonctionnement des sols de haute montagne. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VII, 265 p.
- De Coninck, F., Herbillon, A. 1969. Evolution minéralogique et chimique des fractions argileuses dans des alfisols et des spodosols de la Campine (Belgique). *Pédologie* 19, 2:159-172.
- Duchaufour, P. 1984. *Pédologie, Abrégés*. Masson, Paris, 220 p.
- Hétier, J.M. 1975. Formation et évolution des andosols en climat tempéré. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Nancy I, 194 p.
- Horemans, P. 1984. Carte pédologique à 1/250.000 Paris. Notice explicative. INRA SESCOF, 202 p.

- Jamagne, M. 1964. Introduction à une étude pédologique dans la partie Nord du Bassin de Paris. *Pédologie*, XIV, 2:228-342.
- Klinge, H. 1968. Report on tropical podzols. Doc. FAO, 88 p.
- Moinereau, J. 1977. Altération des roches, formation et évolution des sols sur basaltes, sous climat tempéré humide. Thèse Doct. ès Sciences Univ. Languedoc, Montpellier, 139 p.
- Pédro, G., Jamagne, M. et Bégon, J.C. 1978. Two routes in genesis of strongly differentiated acid soils under humid, cool-temperate conditions. *Geoderma* 20:173-189.
- Ranger, J. et Robert, M. 1985. Caractérisation du fonctionnement physico-chimique des sols forestiers par une approche expérimentale utilisant l'évolution des minéraux primaires. *Agronomie*, 5, 2:157-168.
- Righi, D. 1977. Genèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Poitiers, 146 p.
- Righi, D., Dupuis, T. et Girault, P. 1982. Altération expérimentale du gibbsite par les acides fulviques. Conséquences pédologiques pour les sols du Plateau de Millevaches. *Science du Sol* 2:145-152.
- Robin, A.M. 1979. Genèse et évolution des sols podzolisés sur affleurements sableux du Bassin Parisien. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Nancy I, 173 p.
- Robert, M. et Veneau, G. 1978. Stabilité des minéraux phylliteux 2/1 en conditions acides. Rôle de la composition octaédrique. *Int. Clay Conf. Oxford*. Mortland, M.M. & Farmer, V.C., ed. Elsevier, Amsterdam, 383-394.
- Souchier, B. 1971. Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Nancy I, 134 p.
- Souchier, B. 1984. Les podzols et la podzolisation en climats tempérés et montagnards. Livre Jubilaire du Cinquantenaire AFES, 77-96.
- Schwartz, D. 1986. Les podzols sur sables bateké au Congo. Table Ronde Internationale "Podzols et Podzolisation", Poitiers (à paraître).
- Wilbert, J. 1978. Carte pédologique à 1/100.000, Lesparre-Médoc. Notice explicative. INRA SESCPF, 229 p.

COMPTE RENDU DE LA TABLE RONDE SUR L'EVALUATION
DES SOUS-GROUPES DE SOLS PODZOLIZES

J.M. COSSETTE¹

L'objectif de cette table ronde était d'examiner la classification actuelle des Podzols. La majorité des conférenciers présents au colloque y participaient.

Les concepts servant d'assise à la classification des sols ne sont pas que théoriques. Ils sont choisis après avoir étudié des sols réels. Cela implique que les classifications doivent être changées périodiquement à la lumière de nouvelles connaissances. M. Baril a démontré comment les critères de diagnostic des podzols avaient évolué depuis les débuts de la pédologie.

Les pédologues et les chercheurs reconnaissent que la classification des podzols est imparfaite. Ceux qui font de la prospection souhaitent une réconciliation des critères chimiques avec les critères morphologiques. C. De Kimpe a étudié des sols dont le matériel parental basique est très riche en fer. Bien que ces sols présentent une morphologie de Brunisol, ils répondent aux critères chimiques des Podzols. Des problèmes semblables existent pour les sols issus de cendres volcaniques qui contiennent beaucoup de matériaux amorphes.

¹AGRICULTURE CANADA, pièce C 1.208, 2700 Einstein, Ste-Foy, QC, G1P 3W8

Les recherches se poursuivent pour trouver des solutions à ces problèmes. Quelques intervenants se demandent pourquoi limiter le diagnostic à l'horizon B. N'y aurait-il pas lieu de tenir compte des horizons holorganiques (L-F-H) ou des horizons éluviaux (Ae)? Il semble également que les indices établis à partir des rapports Fe et Al (dithionite) sur Fe et Al (pyrophosphate) apportent des solutions dans certains cas.

La réunion s'est terminée après une proposition de F. Pagé à l'effet que la nouvelle Association Québécoise de Spécialistes en Science du Sol soit saisie de tout problème relié à la classification des sols pour qu'elle en fasse l'évaluation et qu'elle recommande des projets de recherche, le cas échéant.





000 247 584

Les publications de l'ACFAS

- **Les Annales**

Recueils des résumés des communications présentées aux congrès de l'ACFAS, Depuis 1935, (vol. 1 à 55)

- **INTERFACE, la revue des chercheurs**

Le bimestriel de la recherche, depuis 1979

- **Les Cahiers scientifiques**

19. Philosophie et éducation (1984)
20. Informatique et société (1984)
21. La sidérurgie dans l'optique du Québec (1984)
22. Être femme de science (1984)
23. Les ressources humaines et la croissance économique (1984)
24. Recherches en gérontologie (1984)
25. Technologie et politique au Canada. Bibliographie: 1963-1983 (1984)
26. Quelques recherches en biomathématiques (1985)
27. Recherches en gérontologie II (1985)
28. Le droit et l'informatique (1985)
29. Ordinateur et éducation (1985)
30. Le contrôle social en pièces détachées (1985)
31. Aménagement et pouvoir local (1985)
32. La science politique dans les sociétés contemporaines (1985)
33. La sociologie et l'anthropologie au Québec (1985)
34. La personne âgée et la famille (1985)
35. La recherche en hydrologie au Québec (1986)
36. Bioéthique et philosophie (1986)
37. Rétrospective de la recherche sur les sols au Québec (1986)
38. Aménagement et développement: vers des nouvelles pratiques? (1986)
39. Le développement agro-forestier au Québec et en Finlande (1985)
40. Les discours du savoir (1986)
41. La morphologie sociale en mutation au Québec (1986)
42. Milieux et évaluation (1986)
43. Le système politique de Montréal (1986)
44. Égalité et différence des sexes (1986)
45. Biomathématiques (1986)
46. Le fonctionnement individuel et social de la personne âgée (1986)
47. L'intervenant • son vécu • son milieu • son action (1986)
48. Une politique de santé pour le Québec (1986)
49. Aménagement et gestion des ressources (1987)
50. Un marché, deux sociétés? 1^{ère} partie Libre-échange et autonomie politique (1987)
51. Un marché, deux sociétés? 2^{ème} partie Libre-échange: aspects socio-économiques (1987)
52. L'Étude du développement international au Canada (1987)
53. Construction/destruction sociales des idées (1987)
54. La Podzolisation des sols (1987)

- **La collection Politique et Économie**

1. Canada-Mexique, développements différents, problèmes communs (1985)
2. Les subventions fédérales à l'innovation industrielle (1986)
3. Le travail au minimum (1986)
4. Le Québec en chiffres (1986)
5. Le Québec en transition: 1760-1867 (1987)
6. La «Théorie générale» et le keynésianisme (1987)