

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 80 (1990-1991)
Heft: 4

Artikel: Modèle de pédogenèse pour un podzol et un sol brun
Autor: Spaltenstein, Henri
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-279570>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 11.01.2026

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

Modèle de pédogenèse pour un podzol et un sol brun

PAR

HENRI SPALTENSTEIN¹

Résumé.—SPALTENSTEIN H., 1991. Modèle de pédogenèse pour un podzol et un sol brun. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 80.4: 403-417.

Les processus de podzolisation et de brunification sont modélisés à partir de caractéristiques schématisées de deux sites: a) un podzol sous forêt de conifères dans le SE de l'Alaska, et b) un sol brun sous forêt de feuillus du plateau suisse. La roche-mère (une moraine de composition granitique), la position dans le paysage et la durée de pédogenèse sont identiques; seuls sont différents d'un site à l'autre le climat et la végétation. La pédogenèse est examinée en termes de modifications chimiques de l'eau percolant à travers le système végétation-sol. La divergence d'évolution des horizons humifères est liée à la capacité de la végétation à transformer l'acide carbonique de l'eau de pluie en bicarbonate dans les pluviolessivats. Dans le cas du podzol, les pluviolessivats ne contiennent pratiquement pas de bicarbonate, et ce sont alors les acides organiques qui dictent le pH de l'horizon humifère. Dans le cas du sol brun, l'essentiel de l'acide carbonique de la pluie est transformé en bicarbonate dans les pluviolessivats; le pH de l'horizon humifère est alors dicté par ce bicarbonate. Dans le modèle, nous attribuons un rôle central au potassium. Le type de minéral d'altération formé dans les horizons B dépend de la déplétion, ou non, des ions potassium en position interfoliaire dans les minéraux d'illite, et est donc lié à la géométrie de l'enracinement, comme à la physiologie des plantes. Dans le podzol, l'absence de racines dans l'horizon B signifie que les illites restent peu altérées, et par conséquent de l'imogolite se forme. Dans le sol brun, les racines sont abondantes dans l'horizon B et agissent activement comme des «pompes à potassium»; les illites évoluent alors en vermiculites, qui vont piéger l'aluminium, et ainsi prévenir la formation d'imogolite.

¹ Allinges 7, CH-1006 Lausanne

ISSN 0037-9603
CODEN: BSVAAG

© Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

Summary.—SPALTENSTEIN H., 1991. Model of soil forming processes for a Spodosol and an Alfisol. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 80.4: 403-417.

Schematic characteristics of two sites are used in the model. The first site (site A) is a coniferous forest in the Juneau area, SE Alaska, near sea level; the soil is a Spodosol, and the roots are located mainly within the thick O horizon. The second site (site B) is a deciduous forest in the lowland of Switzerland; the soil is an Alfisol with a mollic epipedon and a brown colored B horizon, in which most of the clay is originated by in situ weathering; the roots invaded both the A and the B horizons. Both sites are located on an flat horizontal surface; the parent material is the same (a glacial till of granitic composition), as well as the duration of pedogenesis (about 10 000 years). The differences between sites are mainly the climate and the vegetation.

Soil forming processes are considered in terms of chemical changes of the aqueous phase, from the rain to the soil solution within the C horizon. From one site to another the vegetation has a tremendously different ability to change the carbonic acid of the rain into bicarbonate in the throughfall. On site A the vegetation has little ability, and the organic acids are responsible for the low pH of the O horizon. On site B the ability of the vegetation is high, and the only slightly acidic pH of the A horizon is dictated by the bicarbonate anion.

The amount of bicarbonate in the throughfall is related to the cycling of alkaline cations (mainly K^+ in the model) by the plants, and to the amount of alkaline cations bearing minerals the roots have access to (mainly K bearing minerals in the model, especially Illite).

On site A there are no roots within the B horizon. Illite does not loose K cations, and does not undergo an important change of structure. The aluminium produced by weathering within this horizon has little choice but to combine with soluble silica, and form Imogolite. On site B the roots tend to deplete the mineral soil of potassium. Illite then looses its K^+ , opens and changes into vermiculite. The interlayer space becomes occupied by other alkaline cations, such as Ca^{2+} and Mg^{2+} . The aluminium produced by weathering is then trapped into this interlayer space, making the formation of Imogolite not possible.

Key words : Spodosol, Alfisol, Imogolite, Illite.

1. INTRODUCTION

Le type de sol développé en un endroit donné dépend de cinq variables: la roche-mère, la végétation, le climat, la position dans le paysage, et le temps écoulé depuis le début de la pédogenèse (JENNY 1941). Ce point acquis, le pas suivant serait la modélisation de la pédogenèse en fonction de ces variables. Un modèle très global lie le type de sol essentiellement au climat et à la végétation: à l'échelle de la planète, les grands types de sols suivent la répartition des grands types de végétation et des grandes zones climatiques (DUCHAUFOUR 1983). Un autre modèle néglige la végétation en liant les types d'altération au seul facteur climat (PEDRO 1968). Ces modèles qualitatifs sont utiles du point de vue didactique, et importants du point de vue théorique. Par contre leur application sur le terrain reste un art difficile. En général ils sont appliqués à rebours: le type de sol et le type d'altération sont déterminés sur le terrain, et de ces types est déduit un modèle du jeu des facteurs de pédogenèse.

Formé en France et en Suisse dans le cadre des modèles de Duchaufour et de Pédro, l'auteur s'est trouvé confronté aux Etats-Unis à une autre approche de la pédogenèse: par la solution du sol, développée par F. C. Ugolini et ses collaborateurs à la University of Washington, Seattle; et dans une autre zone bio-climatique: les forêts de conifères du nord de la côtes pacifique du continent nord-américain.

Le modèle présenté ici résulte de deux ans et demi de travail dans les forêts du sud-est de l'Alaska, et de nombreuses discussions avec les collègues américains. Il reprend des concepts développés par F. C. Ugolini, mais publiés jusqu'à aujourd'hui de façon fragmentaire (UGOLINI 1986) ou extrêmement succincte (UGOLINI 1987); un exposé complet de ces concepts n'existe que dans un document officiel mais non publié (UGOLINI 1988). Notre modèle lui doit donc beaucoup; néanmoins il représente une synthèse originale par le lien que nous établissons entre la végétation et le type d'altération. Cela en justifie une publication indépendante.

Ce modèle est élaboré pour deux écosystèmes très typés, qui présentent à la fois des similitudes et des différences frappantes. Les processus que nous invoquons sont simplifiés pour gagner en clarté, quitte à y perdre en authenticité. Mais cela était nécessaire pour dégager des relations modélisables.

2. DONNÉES DE BASE

Ces données de base sont les cinq paramètres de la pédogenèse, fixés par le choix des sites de référence. Les deux sites ont en commun la roche-mère, la position topographique et la durée de pédogenèse. Le premier site est une forêt du sud-est de l'Alaska, dans la région de Juneau, à basse altitude et à proximité de l'océan Pacifique (site A). Le second site est une forêt de feuillus de l'étage collinéen du Plateau suisse (site B). La figure 1 précise la localisation de ces deux régions.

2.1. Roche-mère

C'est une moraine de composition granitique, où l'illite est abondante. Dans les deux cas, le matériau morainique constituant les sols était carbonaté à l'origine, plus faiblement sur le site A que sur le B. La décarbonatation a été rapide (de quelques années à quelques siècles), et l'essentiel des processus de pédogenèse invoqués dans le modèle se sont déroulés après la décarbonatation. Ce matériau est moyennement perméable, et la couche dans laquelle le sol s'est développé se trouve au-dessus de l'aquifère. L'essentiel est que les sols ne présentent pas de trace d'hydromorphie.

2.2. Topographie

Les sites sont sur une surface horizontale.

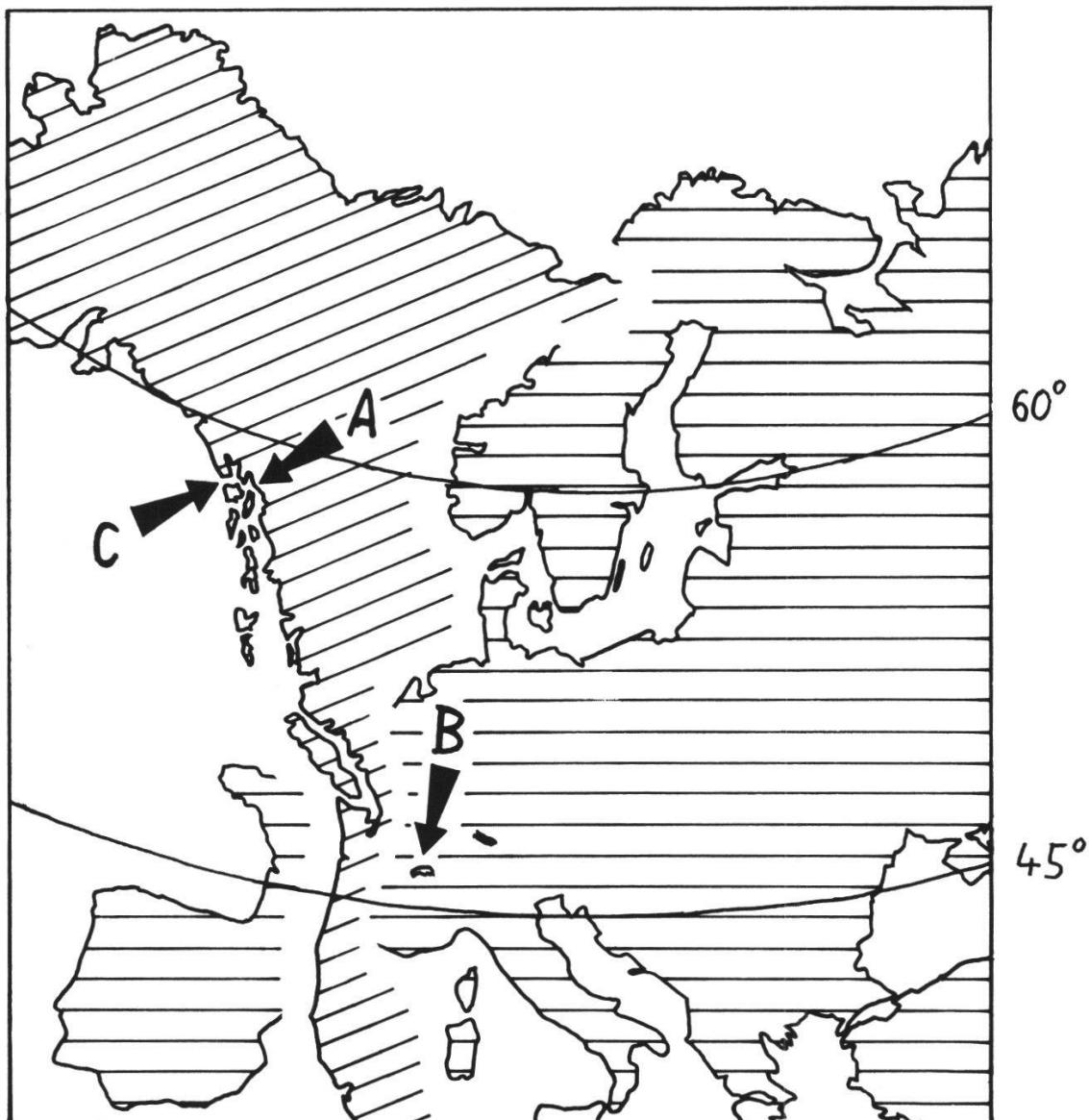


Figure 1.—Localisation du site A (région de Juneau, Alaska) et du site B (plateau suisse). C: Glacier Bay.

2.3. Durée de pédogenèse

La phase décarbonatée de la pédogenèse a débuté il y a environ 10000 ans. Ces conditions de roche-mère, position topographique et durée de pédogenèse, se rencontrent autant dans le SE de l'Alaska (HARRIS *et al.* 1974) que sur le plateau suisse (GRATIER 1980).

Les paramètres différenciant les sites sont le climat et la végétation.

2.4. Climat

Sur le site A, il est de type océanique frais et humide. Les températures caractéristiques sont indiquées au tableau 1. Elles oscillent entre frais et doux

en été, entre frais et froid en hiver. Un couvert nuageux est fréquent (44 jours sans nuage par an). Les pluies sont abondantes (environ 2000 mm, répartis sur 280 jours par an), avec un minimum en juin et un maximum en octobre (ANDERSON 1955).

Au site B, situé à une latitude plus basse, le climat est plus chaud et moins humide. Les températures caractéristiques sont indiquées au tableau 1. Les précipitations sont d'environ 1000 mm par an (répartis sur 150 jours) avec un minimum en février et un maximum en août (BOUET 1972).

Tableau 1.—Paramètre température, valeurs approximatives.

	Site A	Site B
moyenne janvier:	- 4.5	- 0.5
moyenne décembre-janvier-février:	- 1	0
moyenne annuelle:	+ 5	+ 8
moyenne mai-juin-juillet-août-septembre:	+11.5	+15
moyenne juillet:	+13	+17

2.5. Végétation

Dans les deux cas, la végétation est une forêt avec, en sous-bois, une strate arbustive et une strate herbacée ou muscinale. Par souci de simplification, nous traiterons l'ensemble de la végétation comme étant un seul type de plante, désigné par le nom de l'arbre caractérisant la forêt.

Sur le site A, nous avons une forêt de conifères avec un sous-bois de myrtille. Les arbres sont en majorité d'une espèce de conifère habituelle des podzols à horizon humifère épais: *Tsuga heterophylla* (western hemlock), et les racines sont localisées essentiellement dans l'horizon humifère de surface. Ce conifère recouvre en moyenne plus de 60 % de la surface forestière, ce pourcentage pouvant monter localement jusqu'à pratiquement 100 %. Une description de ces forêts est donnée par HARRIS et FARR (1974).

Sur le site B, nous avons une forêt de feuillus, de charmes (*Carpinus betulus*) par exemple. Les racines plongent en profondeur et explorent toute l'épaisseur du sol jusqu'à atteindre l'horizon C. Ce type de forêt est fréquent sur le plateau suisse (SCHMID 1950).

3. LES SOLS

SITE A: HARRIS et FARR (1974) présentent les caractères généraux des sols. Ce sont des podzols, avec un horizon O de 10 à 15 cm d'épaisseur, des horizons E (ou A2) et Bh bien développés, et un horizon Bs d'environ 50 cm d'épaisseur (voir figure 2). L'horizon O comprend une épaisse litière d'aiguilles de conifères; au-dessous un sous-horizon O1 de résidus fibreux de décomposition des aiguilles; au-dessous encore, un sous-horizon O2 résultant de l'accumulation compacte de micro-agrégats noirs plus ou moins sphériques (crottes de collemboles et autres animaux). Ce sous-horizon O2 se gorge volontiers d'eau, ce qui en limite considérablement l'aération pendant une grande partie de l'année. Dans le Bs, le minéral secondaire formé par

altération est l'imogolite. Ce minéral, découvert vers la fin des années soixante dans les Andosols (RUSSEL *et al.* 1969, WADA et YOSHINAGA 1969), est constitué d'aluminium et de silicium dans un rapport de 2 Al pour 1 Si, et d'anions OH⁻ et O²⁻. Sa forme est celle d'un long tube creux, flexueux, dont le diamètre extérieur est d'environ 20 Å. Il peut être détecté par des dissolutions sélectives, et peut être observé au microscope électronique dans des préparations d'argiles. Ce minéral a été signalé dans les horizons Bs de podzols pour la première fois par FARMER (1979), et depuis a été observé dans tous les Bs de pozols où il a été recherché, tout au moins dans le nord-ouest du continent américain (UGOLINI, communication personnelle). C'est pourquoi la présence de ce minéral dans le Bs de notre sol est un fait que l'on peut considérer comme certain.

SITE B: le sol est un sol brun, avec une litière pratiquement inexistante, d'une seule année. L'horizon A est un mull bien structuré et bien aéré de 10 à 15 cm d'épaisseur, suivi d'un horizon B d'altération noté (B) (DUCHAUFOUR 1983), d'environ 80 cm d'épaisseur (figure 2). Il peut avoir été quelque peu enrichi en argile par lessivage. Dans l'horizon A comme dans le (B), les minéraux ferro-magnésiens ont été altérés et ont libéré des hydroxydes et oxyhydroxydes de fer, et les illites sont en voie de transformation en vermiculite (GRATIER 1980, SPALTENSTEIN 1980).

4. LES ARBRES

Dans cette division nous discuterons de paramètres liés à la morphologie et à la physiologie des arbres, plus que des arbres eux-mêmes: la production annuelle de litière, le retour des cations au sol, et la capacité des racines à s'approvisionner en cations dans le sol.

4.1. *La production de litière*

Ce n'est pas une donnée importante en soi: son impact sur la pédogenèse ne peut être compris qu'en relation avec la quantité nette d'acides synthétisés au sein de la litière et celle de cations qui retournent au sol durant le même laps de temps, sur une année par exemple. La matière organique qui tombe au sol induit, lorsqu'elle est plongée dans l'eau, une réaction neutre (coton hydrophile par exemple) ou modérément acide, sans commune mesure avec les pH que l'on peut mesurer dans les humus bruts des podzols. L'acidité de ces humus est engendrée par des transformations de cette matière en acides organiques. Mais ces acides peuvent par la suite évoluer et disparaître par minéralisation (transformation en CO₂ et H₂O); le pH final est alors déterminé par l'acide carbonique H₂CO₃.

L'acidité liée à la matière organique d'un horizon humifère résulte donc de la balance entre les vitesses, d'une part de la synthèse des acides organiques, d'autre part de la disparition de ces acides; en fin de compte: au flux de l'acidité d'origine organique au sein du sol.

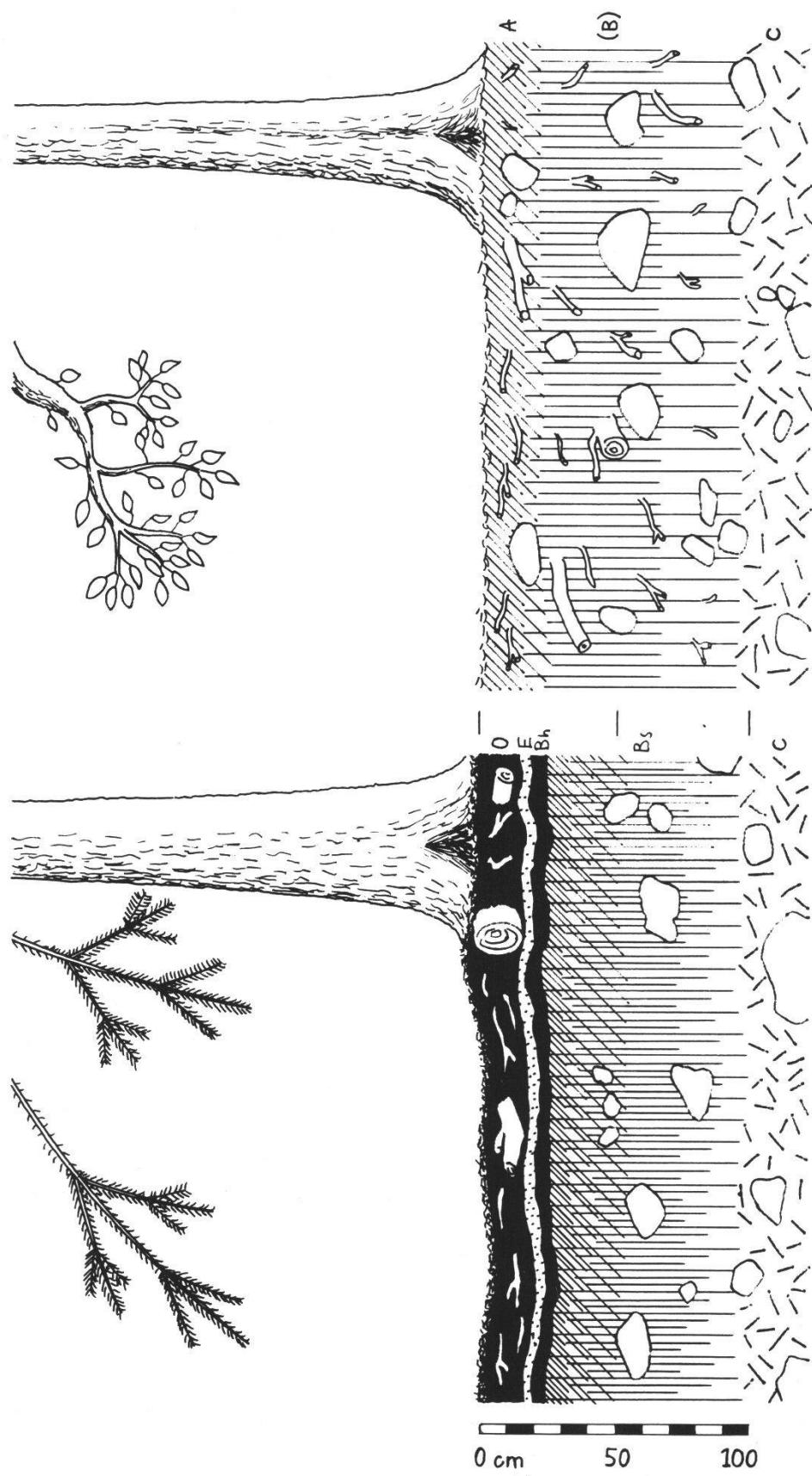


Figure 2.—Représentation schématique du sol, de la végétation et de son entrainement au site A (gauche), et au site B (droite). Tout à gauche: échelle approximative de profondeur. Noir ou hâchures obliques: matière organique; hachures verticales: oxydes et (ou) hydroxydes de fer et d'aluminium.

4.2. *Les pluviolessivats*

Certains cations retournent au sol sous forme solide et accompagnent la chute des feuilles, comme le calcium par exemple, insolubilisé sous forme d'oxalate dans les cellules. Bien plus importants dans notre modèle sont les cations retournant au sol sous forme soluble, entraînés par l'eau de pluie ruisselant sur le feuillage (pluviolessivat). Le potassium est souvent important en quantité (DENAEYER DE SMET 1969, AUSSENAC *et al.* 1972, VÉDY 1973, DUCHAUFOUR 1983) et est même parfois dominant (UGOLINI *et al.* 1988). Dans notre modèle, nous nous intéresserons exclusivement à cet élément. La qualité des pluviolessivats dépend bien entendu de plusieurs facteurs. Par exemple ils sont concentrés après une période de sécheresse, dilués vers la fin d'un épisode pluvieux. Au delà de ces variations, ce qui nous intéresse, c'est le flux annuel moyen. Il dépend de la morphologie des feuilles et de la physiologie de la plante. Une feuille recouverte d'une épaisse cuticule de cire, imperméable, libérera un flux de potassium plus faible qu'une feuille recouverte d'une mince cuticule, relativement perméable. Le premier type cité est bien sûr l'aiguille de conifère, alors que le second est la feuille de charme. Nous schématiserons à l'extrême en supposant que les pluviolessivats de hemlock ne contiennent que des quantités insignifiantes de K⁺.

Le flux dépend aussi de la capacité, ou de la possibilité de l'arbre à compenser ces pertes de potassium, à repourvoir le feuillage. Cette capacité peut dépendre de la physiologie de la plante, de la façon dont ses racines réagissent à la solution du sol et au contact des minéraux, de même que de la masse et de la nature des minéraux que ces racines explorent.

4.3. *Les réserves minérales du sol*

Elles sont potentiellement les mêmes sur les deux sites: même roche-mère, même épaisseur de sol. Mais la différence d'enracinement des arbres suggère d'emblée une source possible de divergence d'évolution des écosystèmes. Dans le site B (feuillus-sol brun), les racines exploitent tout le volume du sol, alors que dans le site A (conifères-podzol), elles ne disposent que de l'horizon humifère de surface: les racines ne sont pratiquement pas en contact avec le matériel minéral.

L'essentiel dans ce qui précède est la balance entre le flux moyen d'acidité d'origine organique au sein de l'humus et le flux moyen de cations (ou le nombre d'équivalents) arrivant au sol. Cette balance: flux d'acidité organique/flux de cations, est qualitativement différente entre les sites A et B.

5. FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

Nous détaillerons le modèle en suivant le ruissellement et la percolation de l'eau de pluie à travers la frondaison et les divers horizons du sol. Ce modèle est celui d'un système en état de quasi-équilibre. Par conséquent certaines caractéristiques des systèmes utilisées au début dans l'explication des

processus (comme le pH de l'horizon humifère et son impact sur la minéralisation) ne trouveront leur explication, leur justification qu'en fin de parcours, quand la boucle sera sur le point d'être fermée.

5.1. La pluie ruisselle sur le feuillage

L'eau de pluie contient de l'acide carbonique H_2CO_3 , en équilibre avec le gaz carbonique de l'air, ce qui lui confère un pH de 5,65. Lorsque cette pluie ruisselle sur le feuillage, les réactions suivantes se produisent:

SITE A: réaction insignifiante. L'acide carbonique H_2CO_3 reste présent dans l'eau de pluie.

SITE B: il y a réaction d'échange à la surface de la feuille:



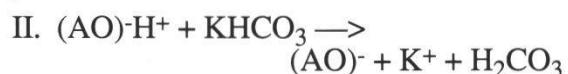
Pour schématiser, nous dirons que tout l'acide carbonique se transforme en $KHCO_3$, bicarbonate de potassium.

5.2. Les pluviolessivats atteignent l'humus

L'acide carbonique rencontre les acides organiques (symbole: $(AO) \cdot H^+$, parfois $(AO)^2 \cdot 2H^+$, etc.) de l'humus.

SITE A. Il n'y a pas de réaction possible. Résultat: la solution du sol renferme les $(AO) \cdot H^+$ et H_2CO_3 . Les acides organiques dictent le pH, qui est aux alentours de 3,5, et l'acide carbonique n'est pas dissocié.

SITE B. Il y a neutralisation des $(AO) \cdot H^+$ par le bicarbonate:



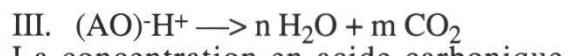
L'anion bicarbonate dicte le pH, stabilisé aux alentours de 5-5,5.

5.3. Evolution de la matière organique de l'humus

Etant donné les conditions de pH, la matière organique de l'humus évolue différemment sur les deux sites.

SITE A. La basse température moyenne annuelle et la mauvaise aération de l'horizon O₂ ne favorisent pas l'activité microbienne: la minéralisation des acides organiques est extrêmement lente. Les ions Al et Fe sont ceux originellement contenus dans les aiguilles. Ils sont en faible quantité, et étant donné le bas pH, ils sont solubles sous forme partiellement hydroxylée. Les acides organiques sont également solubles.

SITE B. En raison de la température moyenne annuelle relativement élevée, de la bonne aération de l'horizon A et du pH modérément acide, il existe une intense activité microbienne de minéralisation; les ions Al et Fe sont sous forme insoluble. L'acidité organique disparaît selon la réaction schématique:

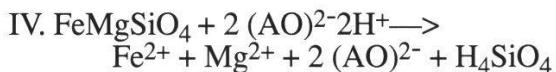


La concentration en acide carbonique augmente, et les cations K^+ sont équilibrés par l'anion bicarbonate.

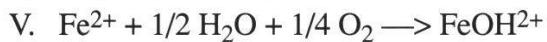
5.4. La solution du sol entre en contact avec des minéraux

La solution du sol, contenant des acides divers en fonction du site, entre en contact avec des minéraux peu altérés: l'horizon E pour le podzol, des minéraux contenus dans l'horizon A pour le sol brun. Nous présentons deux exemples de réactions, avec un silicate ferro-magnésien (FeMgSiO_4), et un silicate alumineux (KAlSi_3O_8). Dans la réalité, le ferro-magnésien a été altéré pour l'essentiel dans une phase antérieure de la pédogenèse. Les olivines sont absentes des moraines alpines. Ce choix est dicté par des considérations didactiques: du point de vue du comportement des éléments chimiques les réactions sont les mêmes qu'avec une amphibole ou la biotite, et cela permet de dissocier les évolutions du fer et de l'aluminium.

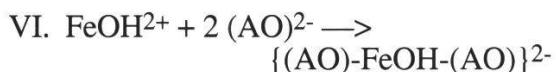
SITE A. Des acides organiques ont réagi avec le minéral ferro-magnésien selon l'équation:



Le fer peut être oxydé et partiellement hydroxylé, par exemple:

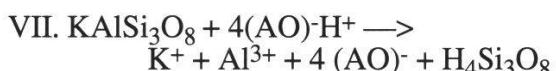


Puis le fer est complexé par les molécules organiques:



Le fer, le magnésium ainsi que les anions organiques sont solubles et peuvent migrer de concert. La silice est elle aussi solubilisée sous forme de molécule neutre, dont la mobilité ne dépend pas de l'apparition ou de la disparition de charges.

Des mêmes acides réagissent avec le feldspath:

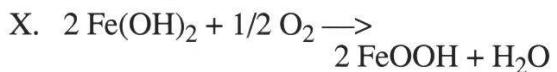


Comme le fer, l'aluminium va partiellement s'hydroxyler et se faire complexer par les molécules organiques, restant ainsi soluble. Ici aussi tout est solubilisé. La solubilisation de la silice, transformée en un gel $\text{H}_4\text{Si}_3\text{O}_8$, sera finalement achevée par réaction avec l'eau:

SITE B. L'acide carbonique a réagi avec le minéral ferro-magnésien de la façon suivante:

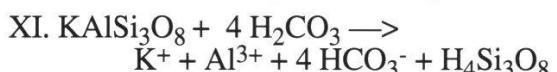


Ultérieurement l'hydroxyde ferreux peut s'oxyder en goethite:



Le résultat est une solubilisation de la silice. Le fer est insolubilisé sous forme de goethite. Le magnésium est sous forme de cation en solution, équilibrant les charges de l'anion bicarbonate.

Le feldspath est attaqué selon l'équation:



La silice est solubilisée par réaction plus ou moins rapide avec l'eau, sous forme de H_4SiO_4 . Le potassium est sous forme de cation en solution, équilibrant les anions bicarbonates. Le ion Al^{3+} ne peut subsister dans la plage de pH régnant dans ce sol (env. 5,5). Il doit donc disparaître de la solution du sol. Il est en fait complexé par les acides organiques, dont il assure la polymérisation et l'insolubilisation (DUCHAUFOUR 1983):



De tels polymères organo-alumineux peuvent se fixer aux argiles et aux limons



Le résultat principal est que tout est solubilisé, y compris le fer et l'aluminium sous forme de cations partiellement hydroxylés et complexés. C'est le processus d'acido-complexolyse (PEDRO 1979) des sols podzoliques. L'acide carbonique subsiste sous forme non dissociée H_2CO_3 .

fins par l'intermédiaire de la goethite précipitée à la surface des particules:



Ces réactions de polymérisation sont rendues possibles par le pH régnant dans cet horizon. Ainsi s'édifie le complexe argilo-humique, conférant à l'horizon A une bonne agrégation. La solution qui quitte cet horizon est, en principe, dépourvue de matière organique soluble.

5.5. La solution pénètre dans l'horizon B

La divergence d'évolution entre les deux sites va aller s'accentuant.

SITE A. Les réactions entre acides organiques et minéraux (réactions IV à VIII), continuant à se produire au passage de l'horizon E, les anions organiques se trouvent peu à peu saturés en fer et en aluminium. Cela et le pH remontant légèrement (p.ex. 4) induisent la précipitation de ces complexes. Ainsi s'édifie sous l'horizon E l'horizon Bh, riche en complexes ferriques, puis au-dessous encore un horizon riche en complexes alumineux. La silice H_4SiO_4 , de même que les cations K^+ et Mg^{2+} , passent à travers le Bh; ils sont accompagnés d'abord par des anions organiques, puis, à mesure que ceux-ci disparaissent par précipitation, par l'anion bicarbonate, dont la dissociation est rendue possible par l'élévation de pH. N'oublions pas en effet que la concentration d'acide carbonique reste élevée.

Au-dessous du Bh, c'est-à-dire dans le Bs, l'altération est donc le fait de l'acide carbonique, selon les réactions IX à XI. Des hydroxydes de fer apparaissent, produisant une couleur ocre-rouille. L'aluminium libéré réagit avec la silice soluble, et ils précipitent ensemble sous forme d'imogolite. L'excès de silice, de même que les ions K^+ , Mg^{2+} et HCO_3^- , gagnent l'horizon C.

SITE B. Les minéraux sont soumis à une altération par l'acide carbonique, selon les équations IX à XI. De la goethite se forme (couleur rouille). De l'aluminium est également libéré, mais il n'est pas soluble dans ces conditions de pH; il doit donc quitter la solution d'une façon ou d'une autre, que nous verrons plus bas.

Le potassium (de même que le calcium et le magnésium) est absorbé en partie par les racines et expédié dans le feuillage, selon un flux dépendant de la physiologie de la plante, pour compenser les pertes dues au lavage des feuilles par la pluie. Néanmoins cette récupération, ce recyclage, n'est pas parfait, et des pertes doivent être compensées. L'illite est alors mise à contribution par les racines pour son potassium interfoliaire, selon l'équation schématique:



Bientôt ce sont des cations alcalins comme Na^+ , Mg^{2+} et surtout Ca^{2+} , échangés avec la solution du sol, que nous retrouvons en position interfoliaire: l'illite est alors ouverte, et est devenue de fait une vermiculite. C'est dans cet espace que l'aluminium va venir finalement se loger, transformant cette vermiculite en une vermiculite alumineuse. Cette séquestration de l'aluminium prévient la formation d'imogolite.

5.6. La solution pénètre dans l'horizon C

Dans les deux sites, la solution pénétrant dans l'horizon C contient de la silice H_4SiO_4 et des cations K^+ et Mg^{2+} équilibrés par l'anion bicarbonate. Ni le fer, ni l'aluminium, ni la matière organique ne pénètrent cet horizon. Quel que soit le site, la qualité de l'aquifère est à peu près la même.

5.7. Résumé

Dans notre modèle, la divergence d'évolution des horizons humifères est liée à la capacité de la végétation à transformer l'acide carbonique de l'eau de pluie en bicarbonate dans les pluviolessivats. A cet égard, le potassium joue un rôle important, relevé depuis longtemps dans la littérature –ce qui justifie le rôle central qu'il joue dans notre modèle. Le type de minéral d'altération formé dans les horizons B dépend de la déplétion, ou non, des ions potassium en position interfolliaire dans les minéraux d'illite, et est donc lié à la géométrie de l'enracinement, comme à la physiologie de la plante. L'absence de racines dans l'horizon B signifie que les illites restent peu altérées, et par conséquent de l'imogolite se forme (podzol). Si des racines sont présentes et agissent activement comme des «pompes à potassium», les illites évoluent en vermiculites, qui vont piéger l'aluminium, et ainsi prévenir la formation d'imogolite (sol brun).

6. DISCUSSION

Devant ce modèle, une question qui vient à l'esprit est la suivante: si ce modèle est correct, en plantant une forêt de feuillus dans le SE de l'Alaska et une forêt de résineux dans le plateau suisse, nous devrions obtenir des sols bruns en Alaska, et des podzols –avec imogolite– en Suisse. Examinons donc cette question.

6.1. Forêt de feuillus sur le site A

Divers feuillus sont présents dans le sud-est de l'Alaska, dont des aulnes (*Alnus rubra*, *Alnus sinuata*, *Alnus incana*), des saules, etc. Des forêts d'aulnes (*Alnus incana*), mélangées d'autres essences feuillues, colonisent des moraines et dépôts fluvio-glaciaires de retrait à Glacier Bay (voir localisation à la figure 1), où depuis deux siècles les glaciers ont reculé dramatiquement. Les stades de colonisation se succèdent en fonction de l'âge des surfaces:

1. surfaces de 1 à 10 ans: lande à *Dryas octopetala* ;
2. " 10 à 50 ans: forêt à *Alnus incana* ;
3. " 50 à 150 ans: forêt à *Picea sitchensis* (sapin de Sitka);
4. " plus de 150 ans: le western hemlock commence à remplacer le sapin.

Il n'existe pas de sol de 10000 ans d'âge qui aurait évolué tout ce temps sous une forêt de feuillus: mis à part les zones en voie de colonisation par la forêt, les aulnaies occupent le terrain où la forêt de conifères a été détruite: couloirs à avalanches, glissements de terrains, etc. (HARRIS et FARR 1974).

Les études effectuées à Glacier Bay sur les aulnaies et leurs sols par UGOLINI (1968) indiquent une tendance claire: l'humus, épais et très riche en matière organique, possède une excellente structure grumeleuse. Le matériau minéral au-dessous ne présente aucune tendance à la formation d'un quelconque Bh, ni d'un E, bien qu'il soit décarbonaté après quelques années seulement. Le matériau minéral tend plutôt vers le (B) d'un jeune sol brun, au sens de DUCHAUFOUR (1983). Il faut attendre 150 ans pour que l'horizon E fasse son apparition, soit un siècle après le début du remplacement des feuillus par les conifères. C'est un long délai. Dans le processus de podzolisation, l'horizon E se forme en général rapidement: environ 100 ans sur les moraines d'Aletsch (PATERNOSTER 1981). Ce délai de 150 ans indique que la dynamique pédogénétique sous les aulnes de Glacier Bay n'est pas orientée vers la podzolisation. Cela est compréhensible: la nitrification, intense sous les aulnaies (ces arbres sont associés à une bactérie fixatrice d'azote), est responsable de l'acidité de ces sols, qui est donc liée à un anion non complexant; l'absence d'anions complexant ne permet pas le développement du processus de podzolisation.

6.2. Forêt de conifères sur le site B

Les plantations d'épicéas sur le plateau suisse, là où poussaient des forêts de feuillus, sont assez répandues et connues pour ne pas devoir être présentées extensivement. Le sol brun d'origine est toujours un sol brun après un siècle de culture d'épicéas. Néanmoins un épais tapis d'aiguilles a pu se constituer, et dans certains cas l'horizon humifère de surface est dénaturé. Il peut devenir très épais (10 cm) et extrêmement organique; des indices morphologiques de terrain suggèrent une migration de composés organiques solubles au sein de cet horizon, et qui précipitent au-dessus des horizons organo-minéraux (GRATIER, GUÉNAT, communication verbale). Il y a donc nettement un changement de dynamique d'évolution de l'horizon humifère, en direction de la podzolisation.

Cette question réglée, nous devons rappeler que notre modèle est presque une caricature, et qu'il doit être complété et nuancé:

—Les caractéristiques de nos deux types de végétation ont été schématisées à l'extrême. Toute plante relâche une quantité plus ou moins importante de cations alcalins dans les pluviolessivats. De même, l'enracinement réel se situe souvent quelque part entre les deux types extrêmes choisis, surtout si l'on considère l'ensemble des strates de végétation. La végétation du sous-bois peut intervenir de façon importante, et accentuer ou contrebalancer les effets de la strate arborée.

—Des processus non envisagés dans le modèle ont un impact, comme la présence ou non d'une faune capable de brasser le sol, de faire remonter à la surface du matériel minéral, ou d'enfouir du matériel organique. Les

lombrics, taupes, etc., sont d'ailleurs absents du site A et abondent au site B. Les chablis, mouvements de terrains, etc., jouent un rôle important dans certains écosystèmes.

—L'histoire du sol, le stade de pédogenèse dans lequel il se trouve, jouent également un rôle. Dans le cas d'une succession de végétation colonisatrice, comme à Glacier Bay, le sol peut se trouver sous une végétation induisant une certaine dynamique, alors que ses caractéristiques sont encore en majorité héritées d'un stade précédent, où la dynamique était autre.

Malgré ses manques évidents, ce modèle présente l'avantage d'être relativement simple, tout en mettant le doigt sur une série de facteurs et de processus clé de la pédogenèse. Ces facteurs et processus, présentés de façon très simple, peuvent être manipulés à loisir. Notre modèle constitue un canevas sur lequel pourrait être brodée la modélisation d'autres situations: sol sous végétation herbacée, sol sur moraine calcaire, sol et végétation sous pluie acide, etc.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON H.E., 1955. Climate in southeast Alaska in relation to tree growth. Alaska Forest Research Center, USDA-Forest Service, Juneau, Alaska. 11 p.
- AUSSENAC G., BONNEAU M., et LE TACON F., 1972. Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements de l'est de la France. *Oecol. Plant.* 7: 1-21.
- BOUET M., 1972. Climat et météorologie de la Suisse romande. Payot, Lausanne. 171 p.
- DENAUYER DE SMET S., 1969. Apports d'éléments minéraux par les eaux de précipitation, d'égouttement sous couvert forestier et d'écoulement le long des troncs. *Bull. Soc. royale de Bot. de Belgique*, t. 102: 355-372.
- DUCHAUFOUR Ph. 1983. Pédologie. Tome 1: pédogenèse et classification. 2^e édition. Masson, Paris. 477 p.
- FARMER V. C., 1979. Possible roles of mobile hydroxy aluminium orthosilicate complex (protoimogolite) and other hydroxy aluminium and hydroxy iron species in podzolization. In: *Migrations organo-minérales dans les sols tempérés*. Colloques internationaux du CNRS N° 303: 275-279.
- GRATIER M. 1980. Les sols du plateau vaudois. *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.*, 16. 3: 90-188. Avec carte et légende.
- HARRIS A.S. et FARR W.A., 1974. The forest ecosystem of southeast Alaska, vol. 7: The Forest ecology and timber management. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, USDA-Forest Service, Portland, Oregon. 109 p.
- HARRIS A. S., HUTCHISON O. K., MECHAN W. R., SWANSTON D. N., HELMERS A. E., HENDER J. C. et COLLINS T. M., 1974. The forest ecosystem of southeast Alaska, vol. 1: The setting. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, USDA-Forest Service, Portland, Oregon. 40 p.
- JENNY H. 1941. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York, 281 p.
- PATERNOSTER M., 1981. Colonisation par la végétation et pédogenèse initiale sur les moraines latérales historiques du grand glacier d'Aletsch. Thèse de spécialité, Univ. Nancy I, 127 p.

- PEDRO G., 1968. Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Revue de géographie physique et géologie dynamique X*, 5: 457-470.
- PEDRO G., 1979. Les conditions de formation des constituants secondaires. In: M. BONNEAU et B. SOUCHIER éd. Pédologie, tome 2, constituants et propriétés du sol, chap. IV: 58-72. Masson, Paris, 459 p.
- RUSSELL J. D., McHARDY W. J., et FRASER A. R., 1969. Imogolite: a unique aluminosilicate. *Clay Miner.*, 8: 87-99.
- SCHMID E., 1950. Carte de la végétation de la Suisse. Carte et notice. Commission phytogéographique de la Société helvétique des Sciences naturelles.
- SPALTENSTEIN H., 1980. Les principaux types de sols du Bois de Chênes (VD) et modèle de répartition spatiale. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 75.1: 23-37.
- UGOLINI F. C., 1968. Soil development and alder invasion in a recently deglaciated area of Glacier Bay, Alaska. In: J.M. TRAPPE, J.F. FRANKLIN, R.F. TARRENT et G.M. HANSEN éd. Biology of Alder. *Proc. 40th NW Sci. Assoc.*: 115-140. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, USDA-Forest Service, Portland, Oregon.
- UGOLINI F. C., 1986. Pedogenic zonation in the well-drained soils of the arctic regions. *Quaternary Research* 26: 100-120.
- UGOLINI F. C., 1987. The proton donor theory, Part I and II. *Agronomy Abstracts. Soil Sci. Soc. Am.*: 233.
- UGOLINI F. C., 1988. Proposal to the National Science Foundation N° BSR-8705503.
- UGOLINI F. C., DAHLGREN R., SHOJI S. et ITO T., 1988. An example of andosolization and podzolization as revealed by soil solution studies, Southern Hakkoda, Northeastern Japan. *Soil Science*, Vol. 145, N°2: 111-125.
- VÉDY J.C., 1973. Relation entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Nancy I. 116 p.
- WADA K. et YOSHINAGA N., 1969. The structure of imogolite. *Am. Mineral.* 54: 50-71.

8. PERSONNES CITÉES

- M. GRATIER: Service de l'aménagement du territoire, Administration cantonale, Lausanne.
- C. GUÉNAT: IGR-Pédologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- F.C. UGOLINI: Dipartimento di Scienza del Suolo e Nutrizione della Pianta, Università Degli Studi, Florence.

Manuscrit reçu le 22 juin 1991