

Evolution comparée d'un sol brun acide de l'étage montagnard moyen des Vosges dans deux écosystèmes forestiers feuillu et résineux

Ildud GUELLEC*

SOMMAIRE

On se propose d'évaluer l'effet d'une implantation d'épicéas sur les caractères pédogénétiques d'un sol brun acide antérieurement occupé par une hêtraie.

Au bout de 70 ans, la fertilité de la station résineuse s'est maintenue, mais plusieurs faits significatifs (hydrolyse plus intense des minéraux primaires, augmentation sensible des pertes en éléments totaux, changement d'état de l'humus, altération du complexe adsorbant) laissent craindre, à long terme, une dégradation de la qualité édaphique de ces sites de production.

Plusieurs recherches entreprises sur le thème « Influence des résineux sur la fertilité des sols » montrent que le remplacement d'une formation feuillue par des résineux se traduit nécessairement par des modifications biologiques (PALLMAN, 1947 ; GALOUX, 1954 ; NOIRFALISE, 1967 ; BAUZON *et al.*, 1969 ; GUILLAUD, 1979), morphologiques et physico-chimiques (BONNEAU et DUCHAUFOR, 1961 ; GENSSLER, 1959 ; SCHLENKER *et al.*, 1969 ; NIHLGARD, 1972 ; RICHERT, 1978 ; PATERNOSTER, 1979 ; NYS *et al.*, 1979 ; NYS, 1981) qui peuvent provoquer une évolution régressive. D'autres auteurs (NYS, 1973 ; NYS et BRETHERS, 1975 ; BONNEAU *et al.*, 1977 ; LELONG et PICH, 1978) ont cherché à préciser les phénomènes d'altération et de migration des éléments par la méthode des bilans minéralogiques et géochimiques (LELONG et SOUCHIER, 1970 ; BRETHERS, 1973) et à chiffrer l'attaque des silicates. A un autre niveau, des études scientifiques approfondies ont abordé le problème sous l'angle de la fertilité. HOLMSGAARD (1968) observe un maintien de la production à la 3^e génération dans l'île de Seeland, résultat confirmé par GENSSLER (1959) pour des peuplements d'épicéa, mais, au contraire infirmé par MIEHLICH (1970) sous une formation identique.

Le problème apparaît en fait très complexe et les éléments de réponse dont nous disposons à l'heure actuelle sont insuffisants pour pouvoir trancher. Dans certains cas extrêmes la dégradation progresse très rapidement, par exemple sur les dépôts de

* Ce travail a été réalisé au Centre de Pédologie Biologique du C.N.R.S. de Vandœuvre (54), grâce à une aide financière de la D.G.R.S.T. dans le cadre de l'Action Concertée « Modification de fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs ».

sables à silex, essentiellement quartzeux, qui s'étendent largement, en Sologne, au sud de la Sauldre où les pins sylvestres ont favorisé la formation en moins d'un siècle de podzols humoferrugineux bien développés (BONNEAU, 1973). Dans d'autres situations, le sol n'enregistre pas de modification sensible au changement de végétation : ainsi sur les sables remaniés constitutifs des milieux « secs » de la Sologne des étangs, qui contiennent une proportion non négligeable de feldspaths, la phase sol brun acide ou intergrade sol brun/sol podzolique est rarement dépassée, en particulier sous les peuplements de pin laricio ou de sapin douglas d'âge comparable (GUELLEC, 1980).

Nous présentons dans cette note notre contribution à l'étude comparée des sols d'un couple résineux-feuillus situé dans un milieu particulièrement sévère de l'étage montagnard moyen, sur le versant occidental vosgien.

1. LES CONDITIONS ECOLOGIQUES.

Notre station se localise au voisinage immédiat du Col du Hantz (Vosges), dans le bois d'Houdimont. Les profils retenus se trouvent sur une forte pente, de l'ordre de 20 %, exposée au sud - sud-est, en haut d'une croupe convexo-concave nommée le « Houdimont » culminant à 830 m d'altitude. Cette situation dans le paysage a été choisie de manière à éviter, dans la mesure du possible, des hétérogénéités de matériau parental (apports obliques en particulier).

1.1. LA VEGETATION.

Le couple résineux-feuillus analysé est constitué par :

- une hêtraie pure de 70 ans environ, en bon état, qui s'étend largement dans ce milieu. Le taux de recouvrement de la strate dominante, qui comprend 4 à 5 individus par are, ne dépasse pas 50 %. Les strates arbustive et buissonnante sont inexistantes. La strate herbacée, au contraire très importante, est constituée exclusivement de canche flexueuse qui occupe 70 % de la surface du sol. La litière, assez abondante, tend à se déposer dans les microdépressions créées par le développement de la canche. Il s'agit le plus souvent d'une litière fraîche, essentiellement de l'année en cours et de l'année précédente, encore bien conservée et s'accumulant peu ;
- une pessière, mitoyenne du peuplement précédent, dont l'implantation remonte au début du siècle (70 ans d'âge environ). Le taux de recouvrement de la strate dominante est de l'ordre de 80 %. On note l'existence d'une strate arbustive abondante, constituée de sapins montrant une abondance-dominance égale à 2. La strate herbacée, assez bien représentée, est à base de ronces (Abondance-Dominance = 2), de myrtilles (Abondance-Dominance = 1), de fougères (*dryopteris dilatata*) et de jeunes pousses de sapins. On relève également la présence d'une strate muscinale (polytrich commun). L'horizon hologranique présente un passage progressif entre les débris végétaux peu décomposés et l'horizon organominéral A1. Il faut signaler la présence de feuilles de hêtre, en quantité non négligeable, venant « contaminer » la litière d'aiguilles d'épicéa et de sapin (rôle du vent).

Il était intéressant de comparer les deux profils des sols bruns acides correspondants, l'un sous hêtre, espèce en régression, ici acidifiante, l'autre sous épicéa, espèce de demi-lumière, à enracinement superficiel, et considérée comme plus agressive.

La végétation agit par les caractéristiques intrinsèques des essences en présence (développement racinaire, structure de la formation) mais également par les quantités d'éléments fertilisants recyclés par les litières grâce au jeu de cycle biogéochimique.

Une analyse foliaire (couche L) indique cependant des teneurs à peine plus élevées en éléments minéraux des litières sous feuillus, à l'exception de la silice qui est plus fortement concentrée sous résineux (cf. tableau 1).

TABEAU 1. — Composition chimique des litières (%)

Chemical composition and ash content of litters under hardwood and conifers (Norway spruce)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Taux de cendres %
Feuillus ...	72	8.2	4.3	3.4	1	6	0.2	4.6	0.35	15.5
Résineux ..	79	6.8	3.1	2.2	0.8	3.4	0.2	4.3	0.25	17.7

1.2. LA ROCHE-MERE.

Le couple repose sur du grès permien qui affleure au niveau du Col du Hantz à la faveur d'une faille. Ce grès permien présente les mêmes caractères généraux partout dans les Vosges et il nous est possible de le décrire (PERRIAUX, 1961). Il s'agit d'un sédiment non trié provenant d'un épandage assez brutal ou d'une coulée boueuse dans un site en position de cuvette par rapport aux reliefs vigoureux avoisinants antepremiens (Massif Gallique). Ce grès présente ainsi un spectre granulométrique étalé allant de la fraction argileuse jusqu'à 7 ou 8 mm.

Le grès permien est certes un grès grossier, mais néanmoins deux fois plus riche en particules fines que le grès vosgien triasique.

L'examen macroscopique permet de déceler d'abondants grains de quartz non usés et anguleux et de nombreux cristaux de feldspaths (orthose...) ayant parfois conservé leurs formes propres. Les grains non usés prédominent dans le grès permien : ce caractère peu évolué du sédiment indique encore une provenance très proche, un transport bref, un dépôt terrestre de piedmont qui évoque un phénomène de sheet-flood.

L'analyse totale de la roche nous révèle la quasi absence de calcium, de sodium (indice d'une grande rareté des plagioclases), de magnésium et de manganèse, la teneur extrêmement basse en fer et la nette prédominance de la silice (près de 88 %). En revanche, l'aluminium et le potassium sont bien représentés (cf. tableau 2).

TABEAU 2. — Analyse totale du matériau parental (en %/m)
Total analysis of the parent material

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Perte au Feu	Total
878	60	9	0.7	2	1.5	1.8	38	3	6	1 000

Ce grès permien est essentiellement constitué de quartz, de feldspaths potassiques et de quelques plagioclases comme, par exemple, l'albite. Sa forte coloration rouge est due à un pigment ferrugineux (l'hématite) qui se présente sous l'aspect d'un enduit très mince qui enrobe les grains de quartz et de feldspaths et qui se trouve surtout associé à la fraction phyllosilicatée.

TABLEAU 3. — Résultats analytiques

Prof.	Hor.	Couleur	Da ² g/cm ³	Hu ³ %	Granulométrie					C %	N %	C/N	pH	
					A	LF	LG	SF	SG					
F ¹	0-7	A1	7.5YR4/1	1.20	20	8.5	5.4	2.2	21.2	57.5	3	0.15	20	3.6
	7-22	A1B	7.5YR4/6	1.32	14	8.8	5.5	2.5	20.3	61	1.25	0.07	19	4.3
	22-55	B	5YR4/3	1.46	12	11	5.4	2.6	20.3	60	0.42	0.06	14	4.7
	55-80	B/C	2.5YR5/4	1.52	11.5	12	4.9	1.8	18	63	0.21	0.019	11	4.7
	> 80	C	2.5YR4/4	1.60		11.7	4.2	1.25	18.5	64	0.15	0.015	10	4.6
R	0-6	A1	10YR4/1	1.05	21	11	4.7	1.5	19	56	4.6	0.19	24	3.6
	6-16	A1B	7.5YR4/4	1.18	16	10.5	4.7	1.7	18	63	1.9	0.09	21	4
	16-60	B	5YR4/4	1.38	12.5	11.7	4.8	1.85	21.7	59.3	0.60	0.04	15	4.5
	60-100	B/C	2.5YR4/4	1.50	13	13	4.2	1.75	21.3	59.3	0.26	0.024	11	4.7
	> 100	C	2.5YR4/6	1.60		11.2	4.7	1.7	17	65	0.24	0.022	11	4.6

1 : F : Feuillus

R : Résineux

2 : Densité apparente

3 : Capacité au champ

Éléments échangeables Meq/100 g								Éléments libres 0/00			
Ca	Mg	K	Na	Mn	S	T	S/T	Fe	Al	Si	Mn
0.30	0.11	0.26	0.05	0.06	0.78	8.6	9	3.75	0.67	0.25	0.05
0.18	0.05	0.14	0.03	0.08	0.48	5.9	8	5.1	1.1	0.25	0.25
0.18	0.05	0.12	0.03	0.02	0.40	3.8	10.5	5.1	1.8	0.25	0.6
0.17	0.04	0.11	0.03	0.01	0.36	3.4	10.5	4.25	2.1	0.25	0.42
0.19	0.04	0.11	0.03	0.01	0.38	3	12.7	3.87	1.87	0.25	0.37
0.48	0.12	0.26	0.05	0.12	1.03	13	8	4.75	0.6	0.5	0.075
0.27	0.07	0.19	0.03	0.13	0.69	7.6	9	5.25	0.85	0.5	0.65
0.23	0.06	0.17	0.03	0.06	0.55	4.7	11.7	5.5	1.3	0.5	1.2
0.21	0.05	0.15	0.03	0.03	0.47	4.3	11	6	1.5	0.5	0.5
0.25	0.06	0.14	0.03	0.02	0.50	3.7	13.5	5.6	1.25	0.5	0.37

1.3. LES DONNEES CLIMATIQUES.

Le climat est de type océanique à tendance continentale nette. Dans la classification des climats régionaux vosgiens (CACHAN, 1974), la zone d'étude se situe à la limite du domaine humide continental et du domaine subhumide de transition dont Sénones constitue un bon exemple. Le Houdimont appartient vraisemblablement au premier type, en raison de l'altitude où se localise notre station, caractérisé par :

— une pluviométrie annuelle de l'ordre de 1.200 mm, répartie sur un nombre de jours supérieur à 150 ;

- une température moyenne de l'année de 8° environ, avec comme mois extrêmes août (15,5 °C) et janvier (< - 1 °C) ;
- un enneigement durable (fin novembre à avril).

Dans la plupart des cas, il pleut autant de mai à octobre que de novembre à avril : l'indice de continentalité pluviale $I = P[V.X/XI.IV]$ est compris entre 0.8 et 1, probablement plus proche de 0.8. La différence $P - ETP$ est de 500 mm durant la période mai - octobre. Le drainage climatique augmente sensiblement dès que l'on aborde l'étage montagnard moyen.

2. MATERIEL ET METHODES.

2.1. LES PROFILS D'ETUDE.

Les deux formations végétales sont installées sur des sols bruns acides évolués. Le remplacement de peuplements feuillus par des épicéas ne se manifeste pas par des contrastes analytiques de base significatifs (cf. tableau 3). Certaines différences morphologiques ou biologiques non négligeables méritent par contre d'être notées :

- l'enracinement est harmonieusement réparti, relativement dense et profond sous feuillus et, au contraire, en nette régression sous résineux, pour une grande part localisé à la base de l'horion superficiel. En A1B et B, les racines deviennent rares ;
- la charge gravelo-caillouteuse dans l'horizon C est de l'ordre de 30 % sous la hêtraie et seulement de 20 % sous la pessière. Dans les autres niveaux, on enregistre respectivement de 7 à 12 % et de 9 à 20 % d'éléments grossiers (> 2 mm) ;
- le foisonnement, s'il est limité en profondeur, en particulier sous feuillus, se manifeste nettement dans les horizons de surface et plus intensément sous la pessière. La pédogenèse se traduit par des augmentations de volume : de l'ordre de 26 % en A1 sous résineux, contre 16 % sous hêtre, et respectivement 16,5 et (seulement) 6 % en A1B. Le foisonnement, qui est peu sensible en B dans l'écosystème feuillu (3,5 %), reste relativement important sous épicéas (8 %).

2.2. METHODES ANALYTIQUES.

Outre les analyses de caractérisation classiques qui sont présentées dans le tableau 3, nous avons réalisé plusieurs opérations destinées à préciser l'évolution pédogénétique dans les deux sous-stations considérées. Ce sont :

- **Un fractionnement de la matière organique.**

La méthode utilisée est basée sur la différence de solubilité des composés humiques* dans des réactifs d'« agressivité » croissante : éthanol, tétraborate de sodium, pyrophosphate de sodium, soude. Les fractions obtenues sont, d'une part, l'ensemble

* De cette fraction est exclue la matière organique fraîche (MOF), micro-divisée, qui a été préalablement séparée par densimétrie 1.8.

acides fulviques (A F) - acides humiques (A H) extraits par les agents alcalins, et les acides hyalomélaniques (A H Y) isolés par l'alcool éthylique, d'autre part, les composés insolubles qui subsistent dans le culot de centrifugation (humines). Sur ce dernier, l'emploi des ultra-sons permet de séparer les composés inextractibles faiblement liés à la matière minérale, ou humine héritée (H3), et les fractions dites « humine d'insolubilisation » (H1 + H2).

— La mesure de l'acidité d'échange.

Après avoir déterminé les caractéristiques essentielles du complexe absorbant à pH 7, valeur arbitraire unifiée pour tous les sols, nous avons dosé les « ions responsables de l'acidité » par la méthode des courbes potentiométriques de titration (ESPIAU et PEYRONEL, 1976 ; ROUILLEL et al., 1979). Une extraction à l'aide d'une solution normale de chlorure de potassium est effectuée sur un échantillon de sol tamisé à 2 mm. L'acidité d'échange est évaluée jusqu'à un pH limite de 8,4 (pH de neutralisation des acidités développées au cours de la réaction d'échange, à l'exception du manganèse) grâce à un titrimètre automatique Tacussel « Urectron 5 ».

L'adjonction de chlorhydrate d'hydroxylamine (OHNH_2Cl 0,2 %) à une solution KCl N permet de connaître la part prise par le fer et le manganèse trivalents dans la saturation des sites d'échange, augmentés de leurs formes facilement réductibles. La capacité d'échange au pH du sol (Te) résulte de la somme des bases échangeables (S) et de l'acidité effective (Ae) titrée dans l'extrait de chlorure de potassium (CHIRITA, 1971).

— L'établissement de bilans d'altération.

Une analyse chimique totale (fusion alcaline au métaborate de strontium et dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique) et un inventaire minéralogique ont été effectués pour chaque horizon. L'objectif consiste à quantifier l'évolution des minéraux du sol, à l'aide des analyses totales (SOUCHIER et LELONG, 1970), et la redistribution des éléments dans les profils par la technique des bilans isoquartz. Le raisonnement isoquartz (LELONG, 1967 ; MEILHAC, 1970 ; LELONG et SOUCHIER, 1970) consiste à mesurer les variations de matière à partir d'un horizon de référence C en les rapportant à celles d'un invariant qui reste relativement constant lors de la pédogenèse. Le quartz, qui peut être considéré comme un minéral à peu près stable sous climat tempéré*, répond le mieux à cette exigence.

— L'évaluation des pertes.

La variation en vraie grandeur d'un élément donné, ΔX_i , dans un horizon « i » par rapport à l'horizon C, s'écrit (MEILHAC, 1970) :

$$\Delta X_i = h_i d_i \left[x_i - x_0 \frac{q_i}{q_0} \right] \quad (1) \text{ où}$$

h_i et d_i représentent respectivement l'épaisseur et la densité apparente de l'horizon « i », x_i et x_0 les teneurs de l'élément considéré en « i » et dans l'horizon C, q_i et q_0 les teneurs en quartz dans ces mêmes niveaux.

* Il n'est pas tenu compte dans ce bilan isoquartz des pertes possibles en quartz par dissolution ou du quartz microdivisé passé dans la fraction fine, ce qui est justement le cas dans nos profils. Les poids isoquartz calculés sont donc estimés par excès.

Pour chiffrer les pertes de manière rigoureuse, il faut tenir compte des différences de densité apparente observées sous les deux formations, dues, pour une bonne part, à un foisonnement (F) sous résineux. Cette augmentation de volume sans variation de la masse de sol peut être définie par :

$$F = \frac{dmC}{dmi} \cdot \frac{Mi}{100} \quad (2) \quad \text{où}$$

dmC et dmi représentent les densités apparentes mesurées des horizons C et « i », et Mi la matière minérale totale présente en « i » (valeur donnée par le bilan isoquartz).

En faisant rentrer le terme 1/F dans la formule (1), nous comparons des pertes de matière dans deux profils équivalents.

— Une analyse de la fraction fine (< 2 μ).

La reconnaissance des types d'argiles à l'aide des rayons X et une analyse totale de la phase fine ont été réalisées.

3. RESULTATS.

3.1. LES CARACTERES BIOCHIMIQUES.

Le fractionnement chimique de la matière organique permet de souligner certaines divergences significatives entre les deux sous-stations (cf. fig. 1) :

— Les taux d'extraction restent relativement faibles dans les horizons superficiels (F* : 37,5 %, R* : 29 %). L'action du tétraborate de sodium prédomine assez nettement sous feuillus (43 % du carbone extractible), même si l'efficacité de la soude reste grande (30 %). Sous résineux, le pouvoir complexant de ces deux réactifs est du même ordre de grandeur (respectivement 35 % et 33 %). Le pyrophosphate de sodium ne joue qu'un rôle très mineur dans les deux types d'humus (10 %). Les acides hymatomécaniques extraits par l'alcool sont mieux représentés (F : 17 %, R : 22 %).

La nature de la matière organique change sensiblement dans l'horizon de transition A1B. Les taux d'extraction augmentent brutalement pour se situer autour de 50 %. Le fait essentiel réside dans l'importance de complexes mobiles ou mobilisables isolés par le tétraborate de sodium sous résineux (42 %), alors que ceux-ci diminuent légèrement, en valeur relative, sous feuillus. L'action exercée par la soude chute brutalement sous la première formation et, au contraire, reste du même ordre de grandeur sous hêtre, ce qui indique sans doute une meilleure dispersion biomécanique des restes végétaux peu transformés et surtout la constitution de complexes organo-minéraux plus stables et plus condensés dans les horizons de surface sous feuillus.

— Les composés humiques résultant de processus d'insolubilisation dominent largement dans l'humus formé sous la hêtraie : les composés extractibles (AF, AH, AHY) et les humines d'insolubilisation (H1 + H2), qui se rencontrent en A1 dans des proportions presque équivalentes, sont beaucoup plus importants (X 2,3) que la somme humine héritée (H3) + matière organique fraîche (MOF). Ce dernier ensemble est, par contre, majoritaire dans l'humus d'épicéa (44 %).

* Pour raison de commodité, nous avons posé F = Feuillus et R = Résineux.

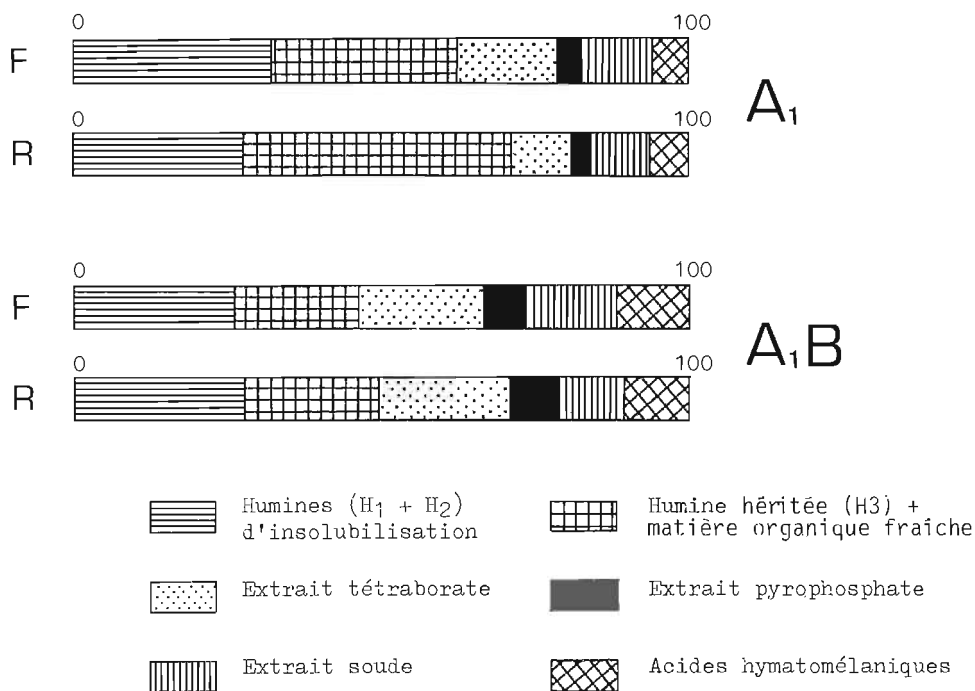


FIGURE I — Fractionnement chimique des composés organiques dans les deux écosystèmes (horizons A1 et A1B). Fractions en %

Chemical fractionation of organic matter in the two ecosystems (A1 and A1B horizons)

La divergence entre les deux humus, manifeste en A1, s'estompe en A1B, qui constitue dans les deux cas un milieu acide et pauvre en argile et en fer. Par sa composition et par sa morphologie, l'humus sous épicéas est très proche du moder type (TOUTAIN, 1974), un moder riche en carbone (MO : 8%) et à C/N élevé (24), alors que la matière organique développée sous hêtres, à C/N sensiblement plus bas (20), plus riche en humines d'insolubilisation et surtout nettement moins pourvue en matière organique fraîche et en humine héritée, semble véritablement intermédiaire entre le mull et le moder. Le changement d'état de l'humus que l'on enregistre, qui résulte de l'introduction de résineux dans une zone antérieurement occupée par la hêtraie d'altitude, va dans le même sens que les observations notées dans des études récentes (MIEHLICH, 1971 ; NIHLGARD, 1971).

3.2. CARACTERISATION CHIMIQUE DU COMPLEXE ABSORBANT.

Les capacités d'échange déterminées à pH 7 augmentent sensiblement dans les horizons de surface (cf. tableau 3). Par ailleurs, les valeurs enregistrées sont systématiquement plus élevées sous résineux. Les teneurs en bases échangeables ne croissent que très graduellement de l'horizon C vers A1 et restent extrêmement basses, de sorte qu'il s'agit de sols hyperdésaturés.

Le calcium et le potassium prédominent largement. Le magnésium, à l'opposé, n'entre que pour une faible part dans la saturation des sites d'échange et devient même

dans les horizons minéraux un élément mineur. Dans les deux cas, mais peut-être sous des formes différentes, on observe une certaine accumulation biologique en A1 des bases alcalines et alcalino-terreuses. Le manganèse manifeste une tendance analogue, sensiblement plus prononcée sous épicéas, mais, de par les conditions édaphiques, devient mobile dès la surface et migre en profondeur. Cet élément se « concentre » dans l'horizon de transition A1B dans les deux sous-stations (F : 16 % ; R : 19 %).

L'acidité d'échange (cf. fig. II), analysée à l'aide du chlorure de potassium, est un bon indicateur du type de développement pédogénétique et, plus précisément, de l'intensité du phénomène de désaturation. L'aluminium constitue l'élément fondamental du complexe absorbant déterminé au pH du sol. Ce cation accapare, dans les deux profils, plus de 70 % des sites d'échange dans les horizons de profondeur. Un minimum marqué apparaît en A1 pour cet élément. Les protons échangeables sont abondants en surface sous les conifères. Le rapport H^+/Al^{13+} élevé (0,40) qui en résulte traduit une pédogénèse agressive sous ce type de végétation. Le rôle joué par les ions H^+ est plus discret dans l'écosystème feuillu ($H^+/Al^{13+} = 0,15$).

Dans les deux sols bruns acides, les taux de saturation calculés au pH du sol restent très bas (< 20 %) à tous les niveaux. Un minimum se situe en A1B pour les deux sous-stations.

L'acidité d'échange présente une allure d'ensemble comparable dans les deux profils, exception faite toutefois de l'acidité protonique. L'analyse des formes échangeables à l'état trivalent du fer et du manganèse et des formes facilement réductibles de ces éléments oppose au contraire significativement nos stations : les quantités observées sont en effet nettement supérieures sous résineux, tant pour le fer (X 1,2 en A1 et X 2,45 en B par rapport à la hêtraie) que pour le manganèse (X 2,3 en A1, X 3,45 en A1B, X 3,1 en B). Outre l'action exercée par ces cations lourds en tant qu'ions responsables de l'acidité totale, même si une fraction très largement minoritaire se trouve effectivement à l'état échangeable (Fe^{3+} , Mn^{3+}), ces résultats dénotent une stabilité fragile de l'équilibre qui se crée dans ces sols entre les formes oxydées et réduites des éléments métalliques. La forte acidité du matériau, et les courtes phases d'anaérobiose relative qui affectent les profils au cours de l'année, facilitent le déplacement de l'équilibre et la conversion du fer et du manganèse en Fe^{++} et Mn^{++} , leur mobilisation et leur entraînement dans les niveaux sous-jacents. Le manganèse, le plus souvent compris entre 1 et 1,5 milliéquivalent dans la hêtraie, présente des chiffres très élevés sous épicéas dans l'horizon de transition A1B et surtout en B où il atteint 5 meq. Il est admis que le manganèse assimilable se trouve sous la forme divalente Mn^{++} (Piper in JACKSON, 1958), alors que les formes facilement réductibles (MnO_1-2) sont réputées inactives et inaccessibles aux plantes. Cependant, les très fortes valeurs des rapports Mn facilement réductible/Mn total observés sous la pessière (> 0,5 en A1B et B) mettent en évidence la capacité du profil considéré à produire des ions manganéux (Mn^{++}).

3.3. LES ARGILES

Les minéraux des fractions fines, identifiés à partir des diffractogrammes de rayons X, appartiennent à plusieurs types : argiles micacées, kaolinite, auxquelles il faut ajouter du quartz et de l'hématite. On a essentiellement affaire à des micas potassiques plus ou moins altérés et, pour une petite part, à toute une série d'intermédiaires entre la muscovite bien cristallisée et des minéraux interstratifiés de type hydromicas ou micas-vermiculite. Une part importante de ces argiles est sans doute constituée de minéraux dioctaédriques très résistants.

L'introduction de conifères dans ce milieu acide n'a pas entraîné de dégradation appréciable des argiles. L'analyse chimique totale confirme l'étroite parenté des types minéralogiques de la fraction fine, si ce n'est leur totale similitude ; tout au plus note-t-on des pourcentages légèrement plus élevés en bases (# 1 %) et en fer (# 0,5 %) sous épicéas. Il n'y a pas non plus d'évolution qualitative notable de bas en haut des profils. Les variations relatives des teneurs des éléments de l'horizon A par rapport à l'horizon C représentent seulement 12 % pour K_2O sous résineux et 15 % sous feuillus, respecti-

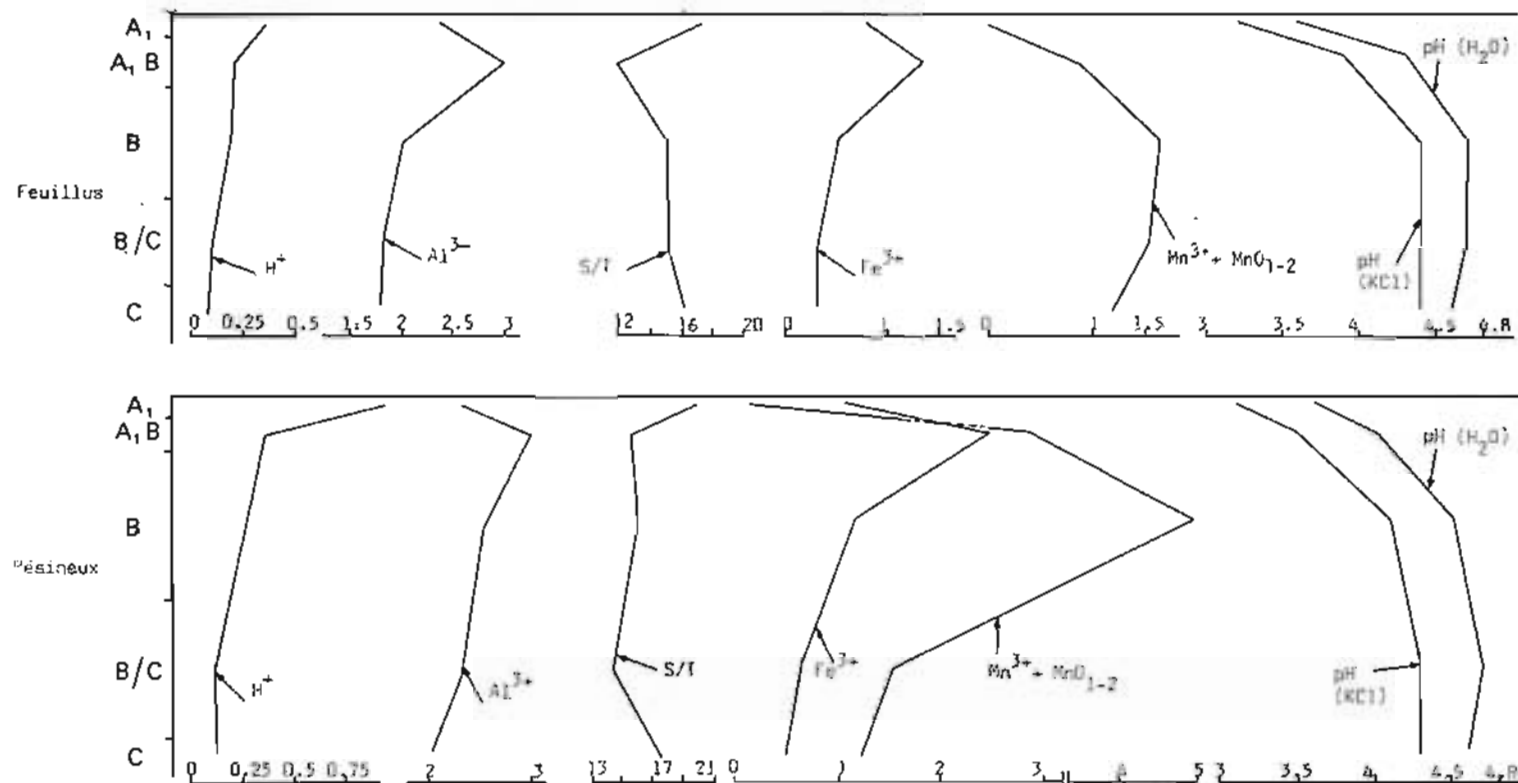
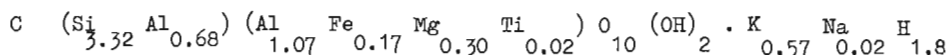
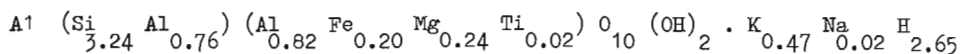


FIGURE II. — Analyse du complexe absorbant au pH du sol (S/T en %, cations en meq/100 g)

vement 18% et 21% pour MgO. Les soustractions restent faibles et certains cations ne montrent pas de variations significatives (l'aluminium, le fer, le manganèse) ou, comme la silice, augmentent légèrement de bas en haut des profils en particulier sous la hêtraie. Les formules structurales des argilles micacées en présence, une fois retranchée la part de Fe₂O₃ qui rentre dans la formation de l'hématite (évaluée à 48% en A1 et à 54% en B/C), d'une part, en négligeant les quantités vraiment insignifiantes de kaolinite d'autre part, s'écrivent* :



Le remplacement de Si⁴⁺ par Al³⁺ dans la couche tétraédrique est largement inférieur à 1. Par rapport à la muscovite idéale, apparaît un déficit d'ions potassiques et un surplus d'ions hydrogènes relativement prononcés. En outre, une substitution au niveau des octaédres des ions Al³⁺ par Mg²⁺, Fe³⁺ et, de manière discrète, par Ti⁴⁺ s'opère dans ce type.

Au total, les minéraux argileux présentent une grande stabilité : essentiellement hérités de la roche-mère, ceux-ci donnent formation, par une évolution très ménagée, à de l'hydromuscovite, une muscovite plus riche en H⁺ et plus pauvre en K⁺ et en Al³⁺ que la muscovite type. Cette stabilité des argiles avait été également notée lors d'une étude d'un couple « résineux-feuillu » installé sur les terrasses sableuses de l'Orléanais (LELONG et PICH, 1978).

3.4. DEVENIR DES MINERAUX PRIMAIRES.

La phase minérale dans l'horizon de référence C, outre la fraction fine, est constituée de quartz (62 à 64% selon la station), de feldspaths potassiques (22 à 23%), groupe dans lequel nous avons reconnu essentiellement de l'orthose, de plagioclases (environ 1% d'albite) et d'un ensemble « divers » représentant approximativement 3 à 4% du squelette minéral, qui est composé, pour la majeure partie, de biotite très altérée et de minéraux hyper-alumineux.

La figure III montre l'allure générale de l'évolution verticale des fractions minérales altérables. Les feldspaths potassiques subissent des pertes sensibles qui se chiffrent à plus de 40% en A1 sous résineux et 24% sous feuillu. Des soustractions de matière apparaissent également pour l'albite, avec un maximum en A1B (F : 16%, R : 28%) et surtout pour le total « divers » dont les taux de variations se situent autour de 50% dans ce même horizon. A l'opposé, le quartz augmente sensiblement en surface (≥ 70%).

3.5. BILANS GEOCHIMIQUES DES ELEMENTS TOTAUX.

Ces bilans établis en poids isoquartz, s'ils n'opposent pas fondamentalement les profils, montrent certaines différences sensibles entre la pessière et la hêtraie (cf. fig. IV)

- la silice et l'aluminium ont un comportement géochimique identique dans les deux sous-stations, qui se traduit, si l'on excepte le léger minimum qui apparaît dans l'horizon de transition sous feuillu, par une soustraction régulièrement croissante de C vers A. Le déficit est de l'ordre de 30% en surface ;
- le fer est plus fortement soustrait sous résineux. Les niveaux A1 et A1B présentent des pertes importantes, respectivement égales à 29 et 19%. Sous feuillu, cet élément montre une bonne stabilité et ne présente de variation négative qu'en A1B ;
- la répartition des bases dans les profils différencie bien les deux formations. L'exportation du potassium en A1 est plus accentuée sous épicéas (35% de

* En raison de la présence de quartz microcristallin, même en faible proportion (< 5%), les formules établies ici sont celles d'un mélange muscovite + quartz. Les pourcentages de silice sont donc, par rapport à une situation avec un seul minéral (mica), surévalués et ceux des autres éléments, au contraire, estimés par défaut.

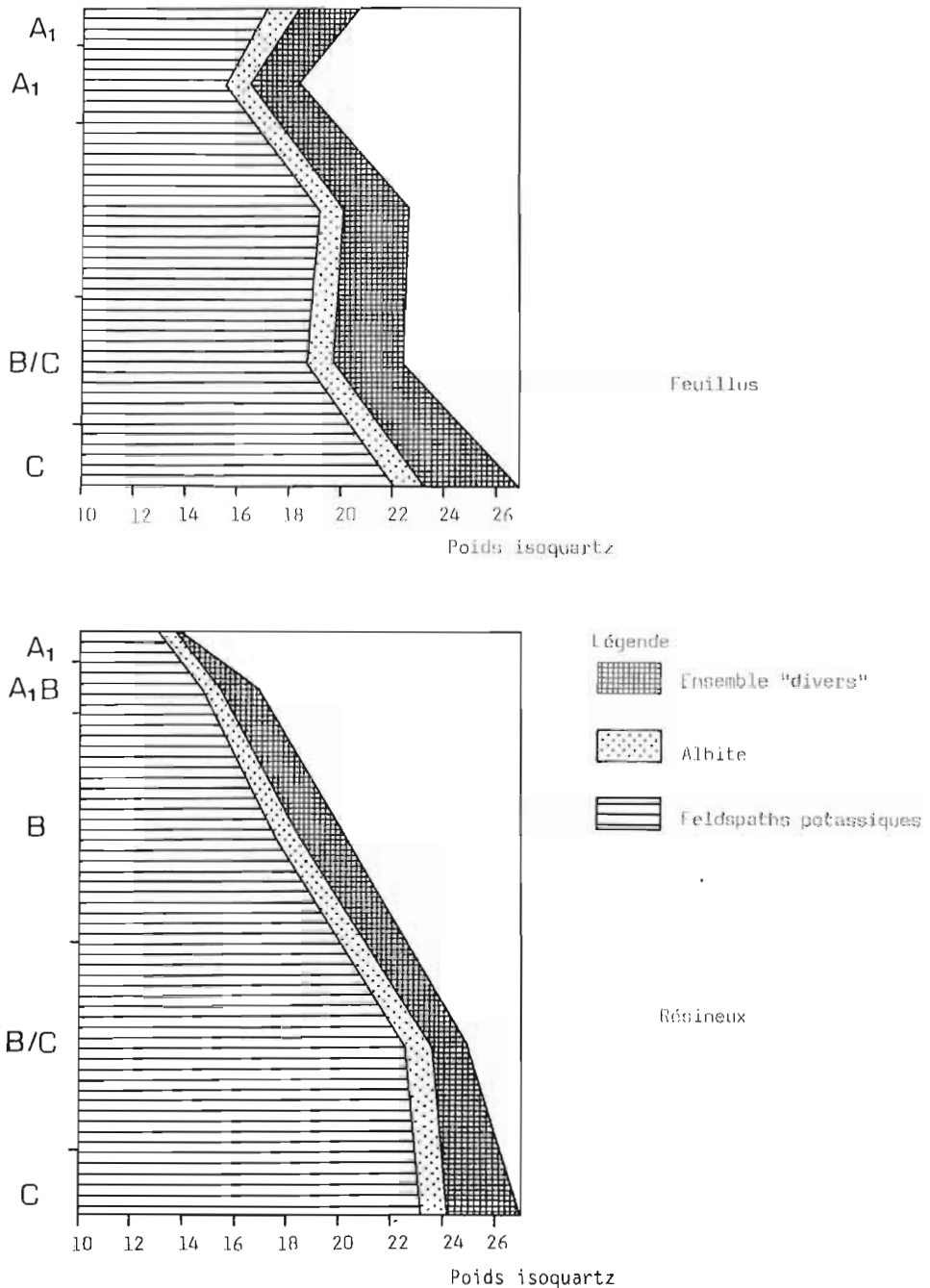


FIGURE III. — Evolution des minéraux primaires altérables le long des profils (poids isoquartz par rapport à 100 g de matériau initial en C)

Distribution down the two profiles (hardwood and coniferous sites) of the weatherable primary minerals (isoquartz weights referred to 100 g. of parent material - horizon C)

pertes) que sous hêtres (27%), et également plus profonde (respectivement 22 et 14% en B). Le magnésium migre encore plus intensément, mais surtout sous feuillus cette fois : les déficits dans les horizons superficiels dépassent 50% dans cette station. Le manganèse subit un entraînement accusé et donne lieu à une redistribution bien marquée et puissante. Les teneurs totales en éléments minéraux tendent à s'épuiser dans l'horizon hémiorganique pour Mn. Les valeurs obtenues pour le sodium s'écartent sensiblement des autres éléments. Ce cation montre une distribution plus régulière dans les profils.

3.6. EVALUATION DES PERTES.

Le calcul du bilan global des éléments s'est heurté au problème d'hétérogénéité verticale relative du matériau, qui se matérialise par une légère accumulation d'argile à moins de 1 m de profondeur sous épicéas (cf. tabl. 3) et par des concentrations en éléments totaux un peu plus grandes en B/C (cf. fig. IV). Cette constatation rejoint les observations faites par NYS dans les Ardennes (NYS, 1981), qui propose l'hypothèse explicative d'un enrichissement en argile par lessivage sous résineux dans les horizons B/C et C. Pour tenir compte de ce fait nouveau, on applique, pour le profil sous résineux, le taux de variation constaté sous hêtraie de C vers B/C à l'horizon C sous épicéas.

Le bilan ainsi corrigé des éléments totaux s'avère plus déficitaire sous la pessière pour la silice, le potassium, le fer et l'aluminium, par ordre d'importance. En ce qui concerne la silice, le déficit paraît très accentué (cf. tabl. 4), mais cependant pas d'un ordre de grandeur très différent de celui constaté à Peyrelevalde, sur le plateau de Millevaches (BONNEAU et al., 1976). L'excédent de pertes induit par l'implantation de résineux se chiffre à 14 t/ha pour le fer, soit, pour un peuplement de 70 ans environ, 200 kg/ha/an, ce qui semble très important. De même, l'aluminium est très touché (11 t/ha). Le potassium montre une soustraction très forte sous la pessière, en augmentation de 33% par rapport à la station « feuillus ».

TABLEAU 4. — Bilan global des éléments totaux (en t/ha)

Global balance of total elements (t/ha): losses or gains under Norway spruce

Elément	SiO2	Al2O3	Fe2O3	K2O	MgO	Na2O	MnO
Feuillus	637	258	15,5	130	26	2,65	+ 5
Résineux	758	269	29,5	173	24,2	2,9	+ 5,7
Pertes ou gains (+) dues à l'épicéa	121	11	14	43		0,25	+ 0,7

A l'opposé, le magnésium est plus intensément exporté sous la hêtraie. Le manganèse présente un bilan positif sous les deux formations en raison essentiellement d'un « stockage », probablement d'origine biologique (retombées annuelles) et chimique (mobilisation en surface et redistribution au sein du profil), dans l'horizon B et, accessoirement en A1B et même B/C. L'altération pédogénétique provoque, par le biais du cycle biogéochimique, une concentration en manganèse, en particulier sous épicéas.

De prime abord, il n'existe pas de contraste vraiment significatif entre les deux stations : les bilans partiels établis pour chaque horizon présentent une même allure générale. Par contre, l'intensité de la soustraction oppose assez franchement les deux types de formations. L'indice d'exportation des éléments, le, qui représente les quantités soustraites par unité d'épaisseur, augmente brutalement des horizons minéraux (B/C : 10, B : 11,5) vers la surface sous feuillus, où le est égal ou supérieur à 15, alors que sous épicéas, cet indice garde une valeur comparable (≥ 15) dans la majeure partie du profil

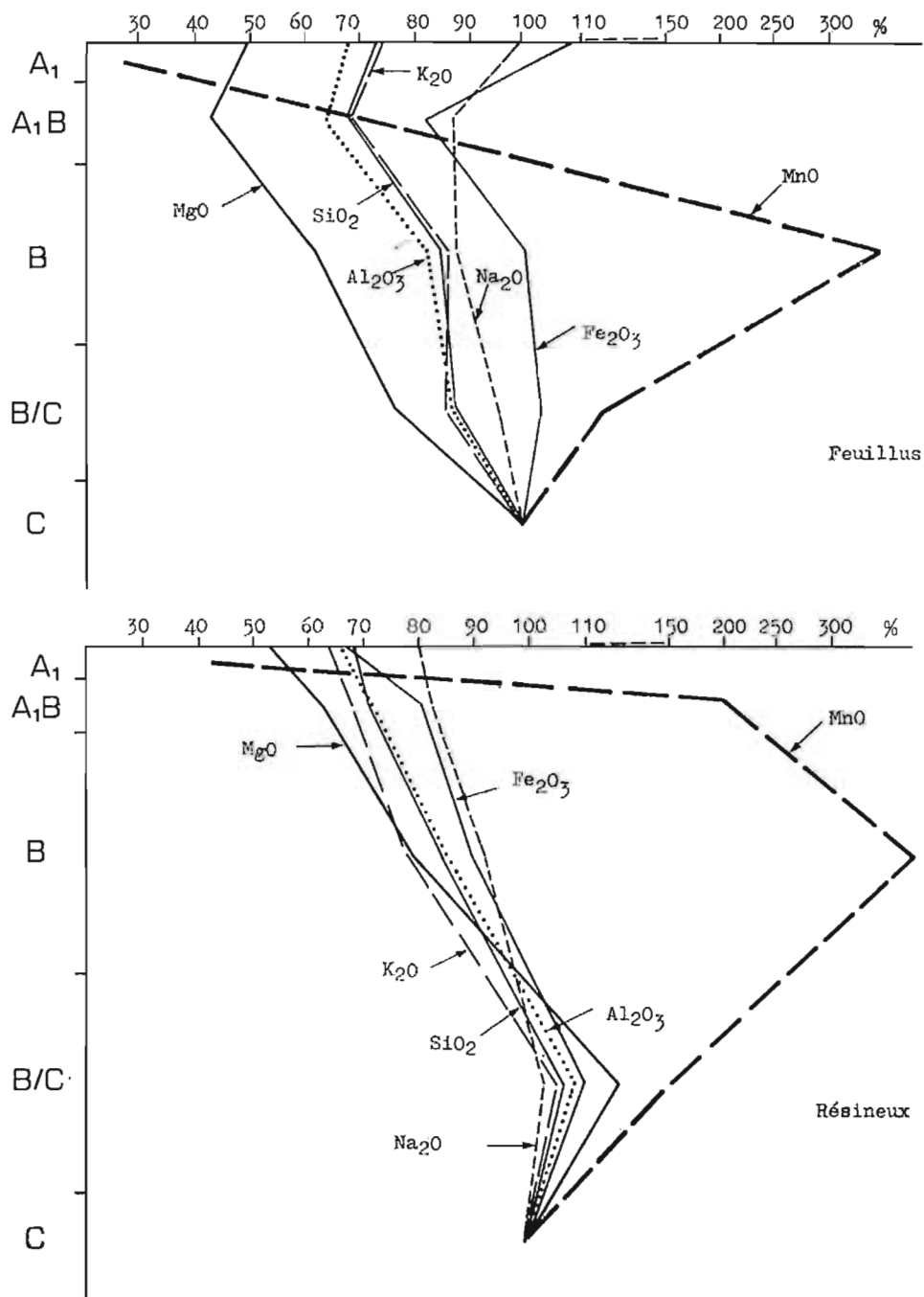


FIGURE IV. — Bilans géochimiques (taux de variations)

Geochemical balance (variation rates)

(tranche de sol de 0 à 60 cm). Un maximum bien individualisé apparaît dans l'horizon de transition A1B, spécialement sous la hêtraie (cf. fig. V). Globalement, cet indice édaphique, qui constitue un critère important pour caractériser le fonctionnement d'un écosystème, prend une valeur sensiblement plus élevée sous résineux.

CONCLUSION.

L'introduction d'une plantation d'épicéas dans une hêtraie à canche de l'étage montagnard moyen des Vosges n'a pas provoqué, après 70 ans, un appauvrissement en éléments essentiels à la production. Les propriétés fondamentales du sol brun acide, qui servait de support à l'ancienne formation feuillue, sont conservées. La culture de l'épicéa se manifeste cependant par un certain nombre d'effets significatifs qui confirment la réputation d'essence « dégradante » de ce conifère. Il se produit ainsi sous la pessière :

- une accélération sensible de l'hydrolyse des minéraux primaires, s'accompagnant d'un développement plus important du complexe d'altération (argiles) ;
- un changement d'état de l'humus, qui se traduit en particulier par une baisse du taux d'humification sous résineux et par une proportion sensiblement plus élevée des composés résultant de processus d'insolubilisation sous feuillus ;
- des modifications physiques et morphologiques non négligeables qui agissent sur les économies gazeuse et hydrique des profils ainsi que sur la vie endogée ;
- un début d' « altération » du complexe absorbant, attesté par une accumulation de calcium et de manganèse en surface, un accroissement de l'agressivité de la solution du sol (H⁺), et surtout par une importance nettement plus grande des cations métalliques facilement réductibles, plus particulièrement de manganèse ;
- une différenciation du développement pédogénétique qui se traduit par des horizons de profondeur sensiblement plus épais que sous feuillus (X 1,45) et, au contraire, des horizons de surface (A1, A1B) plus limités (X 0,7) ;
- des pertes supplémentaires appréciables en silice, en potassium, en fer et en aluminium et, au contraire, un gain mieux marqué que sous feuillus en manganèse. Ces soustractions plus intenses enregistrées dans l'écosystème résineux conduisent à une diminution irréversible des réserves minérales des sols et risquent, à long terme, de menacer la fertilité des stations.

Les risques d'hétérogénéité initiale, et surtout la réalité d'un certain lessivage d'argile en profondeur sous résineux, interdisent malheureusement un « chiffage » tout à fait précis de ces modifications et pose le problème de l'identité des stations d'étude : identité de roche-mère, de granulométrie de la couverture, de position topographique, d'orientation, de climat, et même de traitement forestier (GALOUX, 1954). Il faut noter à ce sujet l'existence de milieux naturels qui présentent des risques d'hétérogénéité extrêmement réduits : ce sont les dunes, les landes atlantiques récemment implantées en résineux qui présentent des sols tout à fait homologues dont il serait possible de suivre et de mesurer le développement pédogénétique (Barshad in MARSHALL, 1978). Parallèlement à l'étude d'une série de situations naturelles, il serait souhaitable également de créer, dans des conditions bien définies, des couples parfaits (parcelles d'expérimentation) qui fourniraient un maximum de renseignements sur l'action des diverses essences forestières sur la pédogenèse.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma reconnaissance à M. BONNEAU, directeur de la Station de recherches sur les sols forestiers du C.N.R.F., et à M. SOUCHIER, directeur du Centre de pédologie biologique du C.N.R.S. de Vandœuvre, qui ont accepté de diriger mes recherches.

Je remercie tout particulièrement M. ROUILLER et ses collaborateurs du Centre de pédologie pour leur appui technique et scientifique.

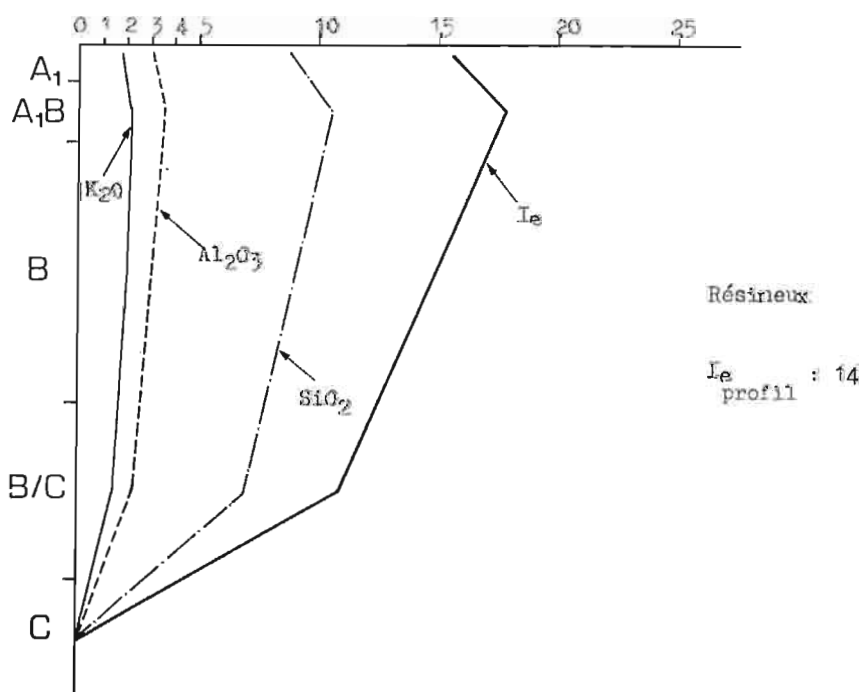
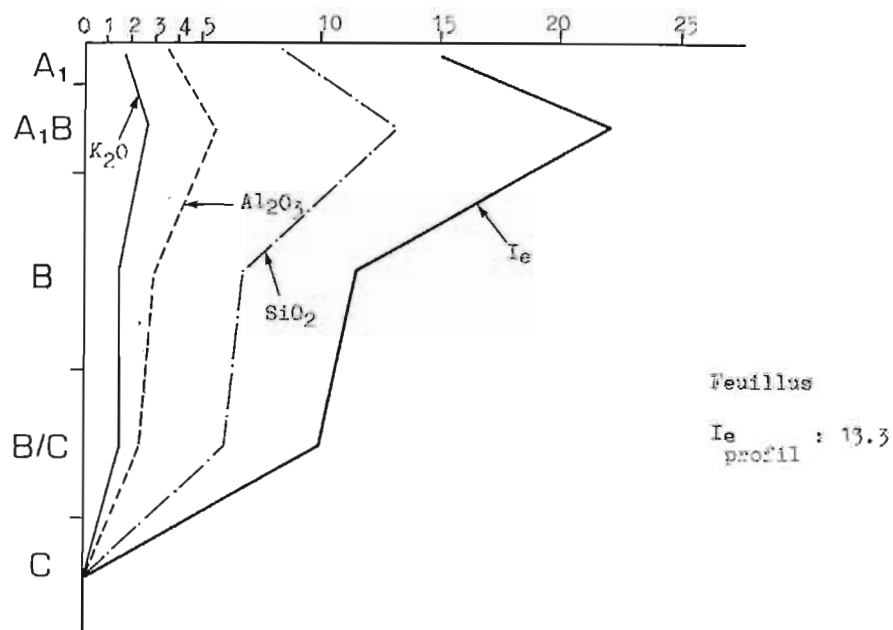


FIGURE V. — Distribution de l'intensité de la soustraction en fonction de la profondeur : indices d'exportation I_e . (pertes par unité d'épaisseur en t/ha)

Indexes of soustraction I_e . (losses per unity of depth in t/ha)

SUMMARY

COMPARISON OF ACID BROWN SOILS DEVELOPMENT UNDER HARDWOOD AND CONIFEROUS FORESTS IN VOSGIAN MOUNTAINS

The purpose of this work is to evaluate the effects on soil characteristics of Norway Spruce planted on former beech forest. The two contiguous sites are located at 830 m on a rounded hill brow, near the Hantz pass in vosgian mountains.

Using an isoquartz check, a mineralogical reconstitution and a determination of the ponderal variations of total elements in the profiles, as compared to the C horizon, were established. A fractionation of the humic substances by a classical method (extractions by alcohol and alkaline reagents), an analysis of the clay minerals and a study of the chemical and some physical properties (bulk density, expansion...) are also carried out in order to have an entire view of the pedological influence of a 70 years spruce stand.

The nutrient level of the acid brown soil developed on permian sandstone is unchanged at the present time, but the results indicate some significant facts which let suppose a long-dated alteration of the productivity of these coniferous sites. These major facts are:

- *a change in the composition of organic matter materialized by a significant increase of «inherited humin» and a relatively low fraction of compounds resulting from insolubilization processes (fig. I);*
- *an «alteration» of the exchange complex characterized by a more pronounced concentration of calcium and manganese in the A1 horizon and by a notable increase of the protonic acidity (see fig II and the H^+/Al^{3+} ratio);*
- *the presence of larger amounts of easily reducible manganese ($\geq 50\%$ of total manganese in A1B and B horizons) and iron (fig. II);*
- *a faster and more intense hydrolysis of primary minerals in the two upper horizons (fig. III). Particularly the K-feldspars show appreciably larger soustractions —especially in the A1 horizon— under conifers (40%) than under hardwoods (24%);*
- *in spite of an identity and a relative stability of the clay fraction in the two profiles, a more developed weathering complex in the coniferous site and probably a more intense translocation of clay down to the B/C horizon (table 3);*
- *an appreciable increase of losses (Si, K, Fe) and, on the contrary, more important gains of manganese (table IV). The exportation-index I_e , which represents the losses of total elements per unity of depth, is significantly higher in the coniferous ecosystem (fig. V);*
- *a soil development leading to physical perturbation (expansion) and horizon differentiation (reduction of the upper horizons and larger development of the subsoil).*

Bibliographie

- BAUZON D., VAN DEN DRIESCHE R., DOMMERGUES Y. (1969). — *Oecologia plantarum*, IV, 99-122.
- BONNEAU M. et DUCHAUFOR Ph. (1961). — *Rev. For. Fse*, 12, 793-799.
- BONNEAU M. (1973). — *Rev. For. Fse*, 15, 4.
- BONNEAU M. et al. (1977). — *Lejeunia*, 82, 14 p.
- BONNEAU M. et al. (1977). — Modification de fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs. Compte rendu de fin d'étude. D.G.R.S.T., 88 p.
- BONNEAU M. (1978). — *Acad. Agr. Fce*, p. 931.
- BONNEAU et al. (1979). — *Rev. For. Française*, 31, 3, 198-207.
- BRETHES A. (1973). — Mode d'altération et différenciation pédogénétique sur leucogranites du Massif du Morvan. Comparaison avec le Massif Vosgien. Thèse Spécialité, Univ. Nancy.
- BRETHES A. et NYS C. (1975). — *Bull. A.F.E.S.*, 1, 3-18.
- CACHAN P. (1974). — *Bull. E.N.S.A.I.A. Nancy*, 16, 1-2, p. 3.
- CHIRITA C.-D. (1971). — *An. Inst. Cercetari Pedol.*, 38, p. 45.
- ESPIAU P. et PEYRONEL A. (1976). — *Bull. A.F.E.S.*, 3, 161-175.
- GALOUX A. (1954). — *Bull. Soc. Roy. For. Belgique*, 345-361.
- GENSSLER H. (1959). — Veränderungen von Boden und Vegetation nach generationsweisem Fichtenanbau. Thèse, Hannwünden.
- GUELLEC I. (1980). — Approche écologique d'un aménagement linéaire en Sologne : l'Autoroute A 71. Etat initial des milieux naturel et humain. 1. *Pédologie*, 13-21. Compte rendu de fin d'étude (en collaboration). D.G.R.S.T.
- GUELLEC I. — Caractérisation de quelques sols majeurs de la Sologne Centrale. Rôle des facteurs écologiques dans la répartition et l'évolution des profils (en préparation).
- GUILLAUD, J. (1979). — Etude comparée du cycle biogéochimique de l'azote dans deux éco-systèmes forestiers feuillu et résineux des Ardennes primaires. *Mémoire E.N.I.T.E.F.*, publication C.N.R.F. C.N.R.F.
- HOLMSGAARD F. (1968). — *Tagungsberichte der Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften in Berlin*, 84.
- JACKSON M.-L. (1958). — Soil chemical analysis, Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, N.J. Sixth printing, 1970, by the Author, Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison, Wis.
- LELONG F. (1967). — Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane). Thèse Doc. Etat., Faculté des Sciences, Nancy.
- LELONG F. et PICH P. (1978). — *Science de la Terre*, 22, 3, 243-271.
- LELONG F. et SOUCHIER B. (1970). — *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, 23, 3-4, 113-143.
- MARSHALL C.-E. (1978). — The physical chemistry and Mineralogy of Soils. Vol. II, 126-131, J. Wiley, N.-Y.
- MEILHAC A. (1970). — Origine et évolution des minéraux phylliteux dans les altérations des granites en pays tempéré. Bilan minéralogique et géochimique sur deux massifs des Vosges. Thèse 3^e Cycle.
- MIEHLICH G. von. (1970). — Veränderung eines Lösslehm - Pseudogley durch Fichtenreinanbau. Dissertation zur Erlangung des Doctorgrades des Naturwissenschaften, Universität Hamburg.
- MIEHLICH G. von (1971). — *Forstw. Cbl.*, 90 : 301-318.
- NIHLGARD B. (1971). — *Oikos*, 22, 302-314.
- NIHLGARD B. (1972). — *Oikos*, 23, 69-81.
- NOIRFALISE A. (1967). — Conséquences écologiques de la monoculture des conifères dans la zone des feuillus de l'Europe tempérée. U.I.C.N., Lucerne, 9, 60-71.
- NOIRFALISE A. et VANESSE R. (1975). — Conséquences de la monoculture des conifères pour la conservation des sols et le bilan hydrologique. Centre d'Ecologie Forestière, Association des Espaces Verts, Bruxelles.
- NYS C. (1973). — *Bull. A.F.E.S.*, 4, 241-254.
- NYS C. (1974). — *Bull. A.F.E.S.*, 3, 207-212.
- NYS C. et BRETHES A. (1975). — *Bull. A.F.E.S.*, 1, 3-18.
- NYS C., PATERNOSTER M., VEDY J.-C. (1979). — Colloque C.N.R.S., Nancy, 31-40.
- NYS C. (1981). — *Ann. Sci. Forest.*, 38, 2, 237-258.
- PALLMANN H. (1947). — Congrès International de Pédologie Méditerranéenne, Montpellier.
- PATERNOSTER M. (1979). — Etude comparée des éléments en solution dans les eaux de gravité de deux écosystèmes forestiers feuillu et résineux des Ardennes Primaires. D.E.A., Univ. Nancy.
- PERRIAUX (1961). — *Mém. Serv. Carte Géol.*, Alsace-Lorraine, 18.
- RICHERT D. (1978). — Etude de l'influence des résineux sur l'acidité des sols et des eaux. *Mémoire E.N.I.T.E.F.* Publication C.N.R.F.
- ROUILLER J., GUILLET B. et BRUCKERT S. (1980). — *Bull. A.F.E.S.*, 2, 161-175.
- SCHLENKER G. et al. (1969). — *Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortkunde*, 19, 72-114.
- SOUCHIER B. et LELONG F. (1970). — *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, 23, 3-4, 95-112.
- SOUCHIER B. (1971). — Evolution des sols sur roches cristallines à l'étage montagnard (Vosges). Thèse Doc. Etat., Univ. Nancy.
- SPYRIDAKIS D.-C., CHESTER G. et WILDE S.-A. (1967). — *Soll Sci. Soc. Am. Proc.*, 31 : 203-210.
- TOUTAIN F. (1974). — Etude écologique de l'humification dans les Hêtraies acidiphiles. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy.
- VEDY J.-C. (1973). — Relation entre le cycle biogéochimique des cations et l'humification en milieu acide. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy.