

NATURE DES COMPOSES FERRUGINEUX ET ALUMINEUX DANS LES HORIZONS B PODZOLIQUES DE SOLS DU QUEBEC EN RELATION AVEC LA PRESENCE D'UNE NAPPE PHREATIQUE

F. PAGE¹ et C.R. DE KIMPE²

RESUME

Des extractions de fer et d'aluminium par le dithionite, l'oxalate, le pyrophosphate et le tétraborate ainsi que des mesures du carbone organique ont été réalisées sur l'horizon B podzolique supérieur de 20 profils de sols sableux situés dans une microtoposéquence. Les horizons Bf, Bhf et Bh se développent respectivement dans les sols dont la surface minérale est située à plus de 30 cm du niveau maximum de la nappe d'eau, entre 30 cm et le niveau maximum, et en dessous du niveau maximum. Les pourcentages de carbone organique ainsi que du fer et de l'aluminium extractibles augmentent graduellement avec la diminution de la profondeur du toit de la nappe, mais décroissent dans les sols dont la surface minérale est située sous le niveau maximum de la nappe. Les relations entre le fer ou l'aluminium extractibles et le carbone organique varient selon la nature de l'horizon et le drainage du sol. Le développement des composés ferrugineux non complexes cristallisés est favorisé dans les horizons Bf, et celui des composés alumineux et ferrugineux non complexes amorphes dans les horizons Bhf. Dans les horizons Bh, on trouve surtout des composés alumineux complexes. La quantité relative des composés alumineux et ferrugineux complexes peptisables par le tétraborate augmente dans les horizons B podzoliques depuis les sols les mieux drainés (Bf) jusqu'aux sols les moins bien drainés (Bh). Ces résultats montrent que l'évolution des composés podzoliques est liée à l'hydromorphie du sol.

INTRODUCTION

Divers réactifs, le dithionite, (d) (MEHRA et JACKSON, 1960), l'oxalate acide d'ammonium (o) (TAMM, 1922 ; Mc KEAGUE et DAY, 1966) et le pyrophosphate de sodium (p) (Mc KEAGUE, 1967 ; BASCOMB, 1968) sont utilisés pour extraire les composés du fer et de l'aluminium dans les sols podzolisés, et sont à la base des critères diagnostiques des horizons B podzoliques (COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS, 1967, SOIL SURVEY STAFF, 1975 ; COMMISSION CANADIENNE DE PEDOLOGIE, 1978 ; AVERY, 1980). Le tétraborate-hydroxyde de sodium (t) a également été proposé comme moyen de différencier les horizons Bh et Bs (BRUCKERT et METCHE, 1972), mais il est moins fréquemment utilisé.

MOTS CLES : Podzol, matière organique, fer, aluminium, horizons B podzoliques, hydromorphie.

1) Service de Recherche en Sols, 2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1P 3w8.

2) Agriculture Canada, Centre de Recherche sur les Sols, Ferme Expérimentale Centrale, Ottawa, Ontario, K1A 0C6.

Ces réactifs permettent de définir deux formes principales de composés ferrugineux (Mc KEAGUE et al., 1971 ; GUILLET et SOUCHIER, 1979 ; JEANROY et al., 1984) : 1) les formes non complexes Fe_0-Fe_6 : formes oxydes et hydroxydes cristallisées ; Fe_0-Fe_p : formes amorphes), 2) les formes complexes (Fe_n : formes hydroxydes amorphes organiques), qui pourraient eux-mêmes être subdivisées en formes immobiles (Fe_0-Fe_i) et mobiles (Fe_i). Leur utilisation rend également possible la définition de divers composés alumineux (Mc KEAGUE et al., 1971 ; GUILLET et SOUCHIER, 1979 ; FARMER et al., 1983) : 1) les formes non complexes (Al_0-Al_p), 2) les formes complexes immobiles (Al_0-Al_i) et mobiles (Al_i). Cependant, on ne connaît pas encore bien la nature des formes d'aluminium dissoutes par les réactifs. Par ailleurs, il importe de souligner que le dithionite et l'oxalate peuvent également solubiliser le fer et l'aluminium de certains minéraux primaires (BARIL et BITTON, 1969 ; ARSHAD et al., 1972 ; PAWLUK, 1972), et le pyrophosphate à mettre en suspension, des oxydes de fer cristallisés (JEANROY et GUILLET, 1981 ; SCHUPPLI et al., 1983).

Deux théories sur la formation des sols podzolisés reposent sur l'interprétation de la nature des composés dissous par ces réactifs. La première est basée sur la migration du fer et de l'aluminium à travers le profil, par la formation de complexes avec les acides organiques, et l'accumulation de ces complexes dans les horizons B (DUCHAUFOR, 1977). La caractérisation des différents composés de fer et d'aluminium, ainsi que l'abondance absolue et relative des complexes organo-métalliques ont servi de critères diagnostiques.

La seconde théorie repose sur la migration de silicates d'hydroxyaluminium et de colloïdes minéraux mixtes ainsi que sur la formation des complexes organo-minéraux au niveau même de l'horizon B podzolique (TAIT et al., 1978 ; FARMER et al., 1980 ; FARMER, 1982).

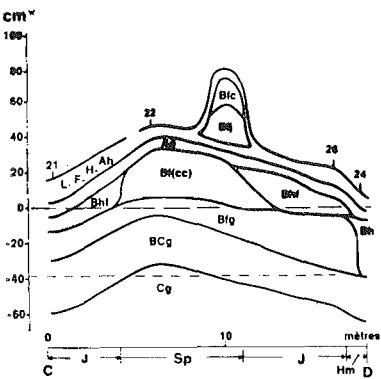
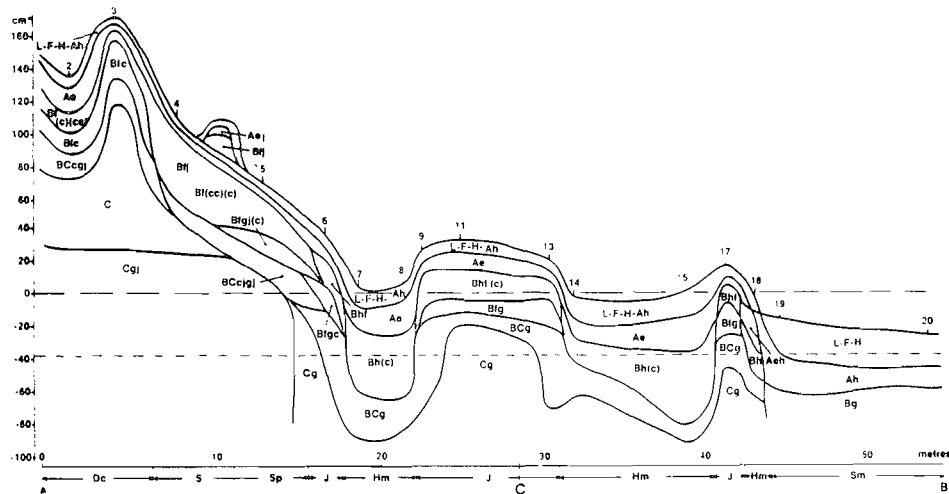
Les travaux de caractérisation des diverses formes de Fe et Al ont été réalisés sur des profils très différents et souvent fort éloignés dans l'espace. Toutefois, des conditions édaphiques différentes ont parfois conduit à des divergences de pensée sur le plan international (Mc KEAGUE et SHELDRIK, 1977 ; HIGASHI et al., 1981). Dans le cadre de la présente étude, il nous a paru intéressant, au contraire, d'étudier les composés ferrugineux et alumineux dans une région restreinte mais incluant cependant des sols podzolisés ayant atteint divers degrés de développement, afin de percevoir les possibilités des critères diagnostiques géochimiques actuels pour différencier les sols.

I. - MATERIAUX ET METHODES

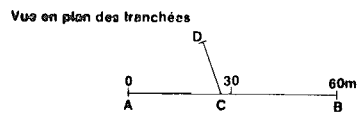
Le site choisi pour cette étude (45° 57' latitude N, 72° 00' longitude O) occupe une superficie d'environ 1 000 m² à 16 km au sud-ouest de Victoriaville dans la plaine du Saint-Laurent (Québec), à environ 2 km au nord-ouest du piedmont appalachien. La roche mère est un sable marin deltaïque remanié par le vent. Le couvert végétal est une forêt mixte d'érables (*Acer Rubrum* L. et *Acer Saccharum* Marsh), de bouleaux (*Betula Papyrifera* Marsh) et de sapins (*Abies Balsamea* L. Mill). A l'échelle régionale, le relief est celui d'une plaine. Localement, le micro-relief est accidenté à cause du remaniement du sol par l'eau et le vent, et à la suite de châblis.

Deux tranchées, longues de 50 à 20 m, ont été creusées (fig. 1). Vingt profils de sols ont été sélectionnés, décrits, échantillonnés et classés (tab. 1) suivant les critères du système canadien (COMMISSION CANADIENNE DE PEDOLOGIE, 1978) et français (COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS, 1967) de classification des sols. Les profils appartiennent au complexe caténaire Saint-Amable, composé des séries de Ste-Sophie, St-Jude et St-Samuel (BARIL et ROCHEFORT, 1957), auxquelles s'ajoutent les séries de Sorel et d'Hemming-Falls (CHOINIERE, 1960), et la série de Des Crêtes (BARIL et ROCHEFORT, 1957).

Le niveau de la nappe phréatique a été mesuré deux à trois fois par mois dans les profils 5, 8 et 17 au cours des années 1981, 1982 et 1983. Au laboratoire, les analyses suivantes ont été réalisées : le pH, dans une solution de CaCl_2 0,01 M ; Fe et Al, dans le dithionite (dithionite-citrate-bicarbonate) (MEHRA et JACKSON, 1960), l'oxalate (SCHWERTMANN, 1973), le pyrophosphate (McKEAGUE, 1967) et le tétraborate (BRUCKERT, 1978) ; le C organique, par oxydation par voie humide (WALKLEY et BLACK, 1934) sur le sol entier ainsi que sur des extraits de pyrophosphate et de tétraborate lyophilisés.



Séries de sols = Des Crêtes (Dc), Sorel (S), Ste-Sophie (Sp),
St-Jude (J), Hemming-Falls (Hm) et St-Samuel (Sm).



— Niveau maximal du toit de la nappe phréatique atteint de la mi-avril à la fin mai.
- - - Niveau du toit de la nappe phréatique généralement atteint de la fin novembre à la mi-avril.

* Position de la surface du sol minéral mesurée à partir du plus haut niveau (niveau de référence 0) du toit de la nappe phréatique.

Figure 1 : Représentation schématique des sols dans la microtoposéquence et disposition des colonnes d'échantillonnage.

Tableau 1 : Classification et distribution des sols en relation avec la nappe d'eau et la qualité du drainage.*Soils classification and distribution as a function of water table and drainage.*

Série de sol	No du profil de sol	Profondeur de la nappe d'eau (cm)#	Drainage	Classification des sols	
				CCP*	CPCS**
Des Crêtes	3	170	Très bon	Podzol humo-ferrique	Podzol ferrugineux
"	2	125	"	"	"
Sorel	4	105	Bon	"	"
Ste-Sophie	5	65	"	"	"
"	22	35	"	"	"
St-Jude	6	30	Modéré	Podzol ferro-humique	Podzol à hydromorphie profonde
"	11	25	"	"	"
"	9	20	"	"	"
"	13	15	Imparfait	"	"
"	17	10	"	"	"
"	26	5	"	"	"
"	21	2	"	"	"
Hemming-Falls	8	-5	Mauvais	Podzol humique	Podzol humique
"	24	-8	"	"	"
"	7	-10	"	"	"
"	18	-12	"	"	"
"	15	-16	"	"	"
"	14	-18	"	"	"
St-Samuel	19	-50	Très mauvais	Gleysol	Sol hydro-morphe
"	20	-60	"	"	"

* Commission Canadienne de Pédologie (1978)

** Commission de Pédologie et de Cartographie des sols (1967)

Profondeur du plus haut niveau de la nappe d'eau mesurée à partir de la surface du sol minéral

II. - RESULTATS

A) Evolution saisonnière de la nappe phréatique, des précipitations et de la température

Trois niveaux de la nappe phréatique peuvent être définis à partir des mesures (fig. 2). Au cours de l'hiver, la nappe se maintient à un niveau à peu près constant d'année en année. Lors de la fonte de la neige, la nappe monte et atteint un niveau maximum, identique d'une année à l'autre, qui correspond au niveau d'inondation. Celui-ci est déterminé par les possibilités d'évacuation de l'eau de surface par les exutoires naturels, et il a été choisi comme point de référence pour cette étude (fig. 1). A partir de la mi-mai, la nappe descend plus ou moins rapidement et atteint son niveau minimum vers la fin de juillet. Le minimum varie considérablement d'une année à l'autre selon les précipitations. Ainsi, 1981 fut une année très pluvieuse, alors que l'été 1983 fut plutôt sec.

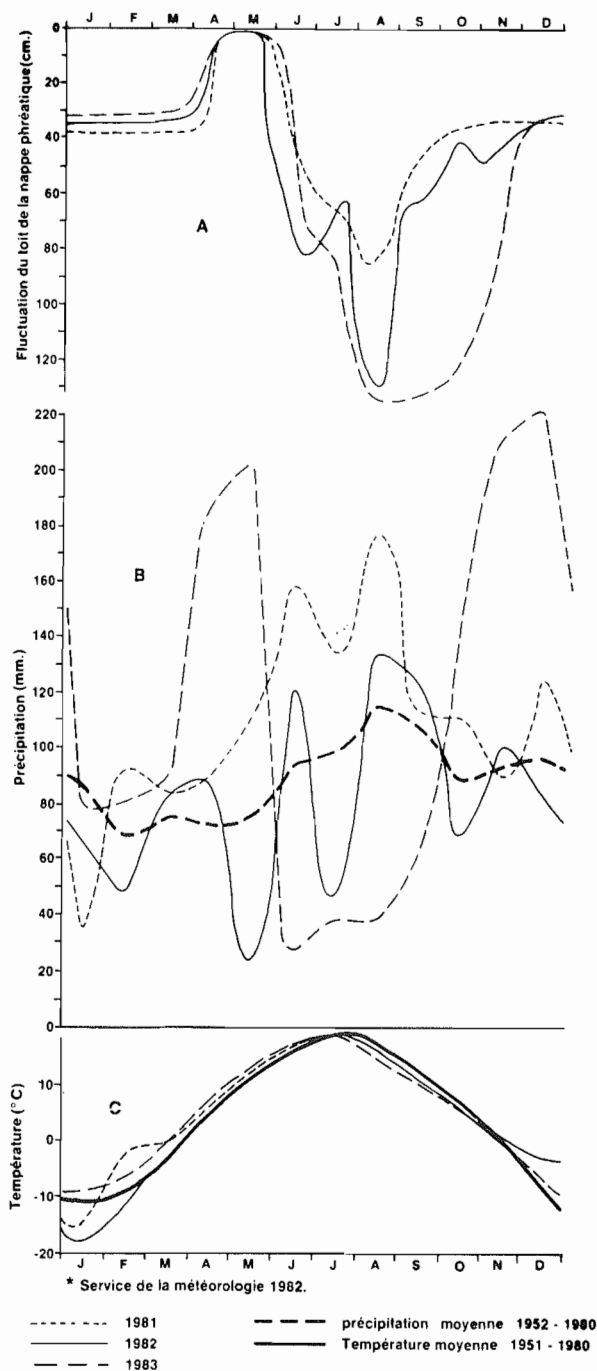


Figure 2 : Evolution saisonnière de la nappe phréatique (A), des précipitations* (B) et de la température* (C).

Seasonal evolution of underground water-table (A), precipitations (B) and temperature (C).

Les températures de l'air sur une période de 30 ans oscillent de $-11,2^{\circ}\text{C}$ en janvier à $19,2^{\circ}\text{C}$ en juillet. La température moyenne de 0°C est atteinte vers le début avril et de nouveau vers la mi-novembre.

Selon la carte climatique du Canada (CANADIAN SOIL SURVEY COMMITTEE, 1977), le climat des sols de la région de Victoriaville appartient à la classe boréale froide et mésique tempérée, subaquique à humide. Le sol a gelé vers la mi-novembre en 1982 pour dégeler vers la mi-avril en 1983.

B) Description et classification des sols

Le drainage interne des profils est bon, et c'est la position des sols dans le paysage qui permet de définir les classes de drainage. L'éloignement plus ou moins grand de la surface du sol minéral du toit de la nappe (fig. 1) détermine l'état du drainage du sol (tab. 1).

Dans le cas des sols bien drainés, les épaisseurs de l'horizon Ae et de la couche L-F-H-Ah sont respectivement d'environ 5 et 3 cm (fig. 3). Mais, elles augmentent rapidement quand les sols sont de moins en moins bien drainés. Toutefois, l'horizon Ae ne se développe plus dans les sols à drainage très mauvais, alors que la couche L-F-H-Ah, plus particulièrement l'horizon Ah, l'est davantage. Ainsi, puisque l'horizon Ae se trouve toujours au-dessus du niveau moyen atteint par la nappe au cours de l'hiver, et l'horizon Ah épais des sols de St-Samuel en dessous de ce niveau (fig. 1), on en conclut que pour engendrer un horizon Ae dans ces sols, plus de neuf mois de libre percolation sont nécessaires, tandis que quatre mois seulement vont plutôt favoriser le développement de l'horizon Ah.

Le degré d'hydromorphie de ces sols influence également la nature des horizons B.

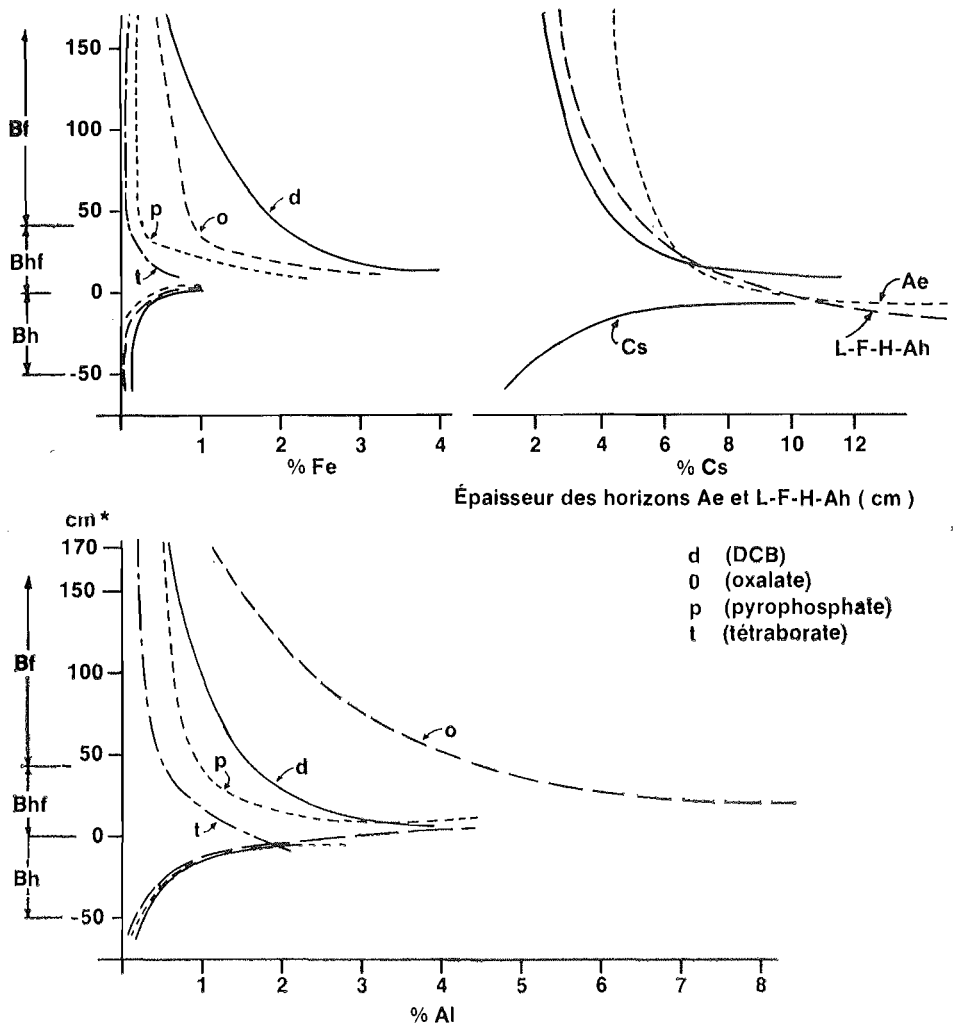
1. Sols caractérisés par un horizon Bf

Parmi les profils qui contiennent des horizons Bf, deux (3 et 2) appartiennent à la série de Des Crêtes et sont caractérisés par une nappe phréatique située à plus de 105 cm de profondeur. Ces sols ont un drainage très bon, bien que les horizons profonds présentent un caractère d'hydromorphie (zones de couleur rouille et zones décolorées), et sont des Podzols humo-ferriques à ortstein (CCP) ou des Podzols un horizon à ortstein (alios).

L'effet de l'humidité capillaire est plus marqué dans les profils 4, 5 et 22 appartenant aux séries de Sorèl et de Ste Sophie, avec un drainage bon et des caractères d'hydromorphie plus proches de la surface du sol (25 cm environ). La nappe comprise entre 30 et 105 cm de profondeur, affecte surtout la base des horizons B podzoliques de la série de Ste-Sophie. Ces sols sont des Podzols humo-ferriques orthiques ou gleyifiés (CCP) ou des Podzols ferrugineux (CPCS) (tab. 1), pouvant contenir parfois un horizon à ortstein (alios).

2. Sols caractérisés par un horizon Bhf

Parmi les sept profils de la série de St-Jude qui contiennent des horizons Bhf, trois (6, 11 et 9) ont un drainage modéré, tandis que les quatre autres (13, 17, 26 et 21) ont un drainage imparfait. La profondeur de la nappe est comprise entre 0 et 30 cm. Dans ces profils, les horizons B sont généralement à l'intérieur de la frange d'ascension capillaire, au-dessus du niveau maximal de la nappe, ou dans la zone de battement de nappe entre les niveaux de printemps et d'hiver. Ces profils se classent parmi les Podzols ferro-humiques gleyifiés (CCP) ou les Podzols à hydromorphie profonde (CPCS).



* Position de la surface du sol minéral mesurée à partir du plus haut niveau (niveau de référence 0) du toit de la nappe phréatique.

* Mineral soil surface position measured from the highest level of underground water-table (level 0).

Figure 3: Relation entre le fer, l'aluminium et le C organique total dans les horizons B podzoliques supérieurs (Cs), l'épaisseur des horizons Ae et L-F-H-Ah et la profondeur du plus haut niveau du toit de la nappe phréatique.

Chemical and physical characteristics of the spodic B horizons as a function of underground water-table depth.

3. Sols caractérisés par un horizon Bh

Six profils (8, 24, 7, 18, 15 et 14) appartiennent à la série d'Hemming-Falls. Ils ont un drainage mauvais, contiennent généralement des horizons Bh(c) et sont des Podzols humiques orthiques ou à ortstein (CCP), ou des Podzols humiques (CPCS). Le

toit de la nappe phréatique dans ces profils est compris entre le niveau de référence 0 et le niveau — 50 cm (fig. 1).

4. Sols caractérisés par un horizon Bg

Deux profils (19 et 20) appartiennent à la série de St-Samuel. Ils ont un drainage très mauvais, contiennent des horizons Bg et sont des Gleysols humiques (CCP) ou des Sols hydromorphes (CPCS). Le toit de la nappe phréatique se situe sous le niveau — 50 cm (fig. 1).

C) Analyses chimiques

1. Horizons C

La roche mère (Cg) des sols, relativement homogène, est caractérisée par de faibles pourcentages (tab. 2) de C organique ainsi que de Fe et Al extractibles. Il y a donc peu de minéraux du matériel originel dissous par les réactifs.

2. Horizons B supérieurs

Les teneurs en Fe, Al et C organique (tab. 2) en fonction de la hauteur de la nappe et de la nature de l'horizon sont reportées à la figure 3 :

— Dans les horizons Bf, le pH moyen est de 5,0, et les contenus en C organique total et en Fe et Al extractibles augmentent modérément lorsque la profondeur de la nappe phréatique diminue ; les composés ferrugineux et alumineux non complexes ($\text{Fe}_{\text{e}}\text{-Fe}_{\text{p}}$ et $\text{Al}_{\text{e}}\text{-Al}_{\text{p}}$) sont plus abondants que les composés ferrugineux et alumineux complexes dissous par le pyrophosphate (Fe_{c} et Al_{c}) et le tétraborate (Fe_{t} et Al_{t}), ces derniers étant très peu abondants ; les pourcentages moyens du C organique extrait au pyrophosphate (Cp) et au tétraborate (Ct) représentent respectivement 80 et 40 % du C organique total (Cs).

— Dans les horizons Bhf, le pH moyen est de 4,5, et les teneurs en C organique et en Fe et Al extractibles croissent rapidement lorsque la profondeur du toit de la nappe phréatique diminue ; les composés ferrugineux complexes et non complexes amorphes sont plus abondants que dans les horizons Bf, l'importance des premiers croît davantage avec la diminution de la quantité du drainage ; l'abondance des composés alumineux non complexes est la plus forte dans les horizons Bhf des sols les mieux drainés, et décroît avec la diminution de la qualité du drainage ; les composés alumineux complexes ont un comportement inverse ; les pourcentages moyens du C organique extrait au pyrophosphate et au tétraborate représentent respectivement 80 et 60 % du C organique total.

— Dans les horizons Bh, le pH moyen est de 4,4, les teneurs en C organique et en Fe et Al extractibles décroissent lorsque la profondeur du toit de la nappe phréatique diminue, et les quantités du fer extrait au dithionite (Fe_{d}) et à l'oxalate (Fe_{o}) sont inférieures à celles des horizons Bf et Bhf ; ce sont les composés ferrugineux non complexes cristallisés ($\text{Fe}_{\text{c}}\text{-Fe}_{\text{o}}$), mais surtout les composés ferrugineux et alumineux complexes dissous par le tétraborate qui se développent dans les horizons Bh ; les pourcentages moyens du C organique extrait au pyrophosphate et au tétraborate représentent respectivement 90 et 80 % du C organique total.

— Dans les horizons Bg, le pH est de 4,5 en moyenne, les teneurs en C organique et en Fe et Al extractibles sont faibles ; les pourcentages moyens du C organique extrait au pyrophosphate et au tétraborate représentent respectivement 90 et 80 % du C organique total.

En résumé, d'après le tableau 2 :

1) en milieu bien drainé, le fer libre existe sous toutes ses formes : oxydes cristallisés et amorphes, et complexes organiques ; l'aluminium se trouve être sous divers états amorphes minéraux et organiques ; de plus, $Fe_d \geq Fe_o > Fe_p > Fe_t$ et $Al_o > Al_s > Al_p > Al_t$.

2) en milieu mal drainé, le fer libre est peu abondant ; l'aluminium se trouve être présent sous forme organique ; de plus,

$$Fe_d > Fe_o \approx Fe_p \approx Fe_t \text{ et } Al_o \approx Al_s \approx Al_p \geq Al_t.$$

Tableau 2 : Caractéristiques chimiques des horizons B supérieurs et de la roche-mère (Cg).

Chemical characteristic of the upper B horizons and the parent material.

No de profil	Epaisseur de l'horizon (cm)	pH	C org. (%)			Fe (%)				Al (%)				Nature de l'horizon (CCP)#
			s*	p	t	d	o	p	t	d	o	p	t	
3	5	5,0	2,7	2,2	0,9	0,8	0,4	0,1	0,02	0,8	1,4	0,6	0,3	Bfj
2	9	5,0	1,9	1,5	0,6	0,8	0,5	0,1	0,01	0,6	1,3	0,5	0,2	Bf
4	13	5,2	3,0	2,4	1,2	1,4	0,7	0,2	0,02	1,1	2,7	0,7	0,3	Bfjl
5	10	4,9	4,1	3,2	1,6	1,5	0,8	0,2	0,01	1,4	3,7	0,8	0,4	Bfjl
22	13	5,0	3,2	2,6	1,1	1,4	0,8	0,3	0,05	1,2	2,8	0,8	0,4	Bf
6	10	4,9	5,0	4,7	2,3	1,4	0,9	0,2	0,03	1,7	5,0	1,3	0,6	Bhf
11	14	3,7	5,7	4,6	2,2	3,0	2,4	0,5	0,03	2,4	8,8	1,6	0,5	Bhf
9	15	4,9	7,3	5,8	2,2	3,9	1,7	0,8	0,1	3,4	5,6	1,8	0,7	Bhf
13	10	4,5	6,8	6,1	3,8	2,9	2,8	1,8	0,3	3,6	5,2	3,4	1,4	Bhf
17	11	4,3	11,3	10,7	4,5	2,7	2,9	1,9	0,5	2,4	2,9	2,5	1,0	Bhf
26	10	4,6	11,1	10,0	5,7	2,4	2,8	2,1	0,4	3,8	4,4	4,0	1,7	Bhf
21	10	4,5	12,5	nd**	nd	3,3	2,9	2,9	0,8	4,7	5,7	5,7	2,8	Bhf
8	20	4,2	9,8	8,8	8,7	0,7	0,3	0,3	0,2	2,0	2,0	2,2	1,8	Bh
24	8	4,9	7,1	6,5	5,1	0,3	0,2	0,2	0,1	1,3	1,8	1,3	0,9	En
7	14	4,0	9,1	8,0	9,1	0,3	0,2	0,2	0,2	2,0	2,0	2,4	2,1	Bhc
18	9	4,6	4,8	4,3	4,3	0,3	0,03	0,1	0,1	1,0	1,2	1,2	1,0	Bh
15	14	4,3	3,2	3,0	2,6	0,1	0,05	0,02	0,03	0,7	0,7	0,7	0,7	Bhcj
14	7	4,3	3,9	3,5	3,2	0,2	0,06	0,04	0,03	0,7	0,7	0,7	0,7	Bh
19	11	4,4	1,1	1,0	0,9	0,1	0,03	0,1	0,04	0,5	0,2	0,3	0,2	Bg
20	10	4,6	1,2	1,0	0,9	0,1	0,01	0,02	0,03	0,2	0,2	0,2	0,2	Bg
7		4,8	0,1	nd	nd	0,1	0,03	0,02	0,01	0,1	0,1	0,1	0,01	Cg

* Cs: C organique total du sol, d: extraction au dithionite, o: extraction à l'oxalate, p: extraction au pyrophosphate, t: extraction au tétraborate

** non déterminé

Commission Canadienne de Pédologie (1978)

III. - DISCUSSION

A) Distribution de la matière organique en fonction de l'humidité du sol

L'hydromorphie des sols influence la dégradation de la matière organique (BERNIER, 1960) et, par conséquent, les quantités de carbone organique présent dans les horizons B. Dans les sols très bien à imparfaitement drainés étudiés ici, on note une augmen-

tation simultanée de l'épaisseur de la couche L-F-H-Ah et du pourcentage de carbone organique dans les horizons B supérieurs (fig. 3). Il existe donc, dans les horizons Bhf, des mécanismes de migration et d'accumulation plus importants et une décomposition de la matière organique moins rapide que dans les horizons Bf. Mais il y a une plus faible possibilité de remise en solution que dans le cas des horizons Bh. En effet, dans les sols contenant de tels horizons et soumis plus fortement à l'influence de la nappe (profils 8, 24, 7, 18, 15, 14, 19 et 20), l'épaisseur de la couche L-F-H-Ah augmente encore davantage, bien que le pourcentage de carbone organique décroisse dans les horizons B. Ces horizons sont submergés pendant la majeure partie de l'année, et ne sont aérés que lorsque la nappe est rabattue, pendant l'été et l'automne. Bien que ce milieu puisse favoriser la formation d'acides organiques dans la litière, ces acides sont éliminés avec l'eau de la nappe lorsque celle-ci est élevée, et s'accumulent dans les horizons B lorsqu'elle est basse. De ce fait, à partir d'un certain degré d'hydromorphie, plus longue sera la période de submersion, plus faible sera l'accumulation de la matière organique dans les horizons B.

Il faut enfin souligner que l'épaisseur de l'horizon Ae croît à peu près de la même manière que l'épaisseur de la couche L-F-H-Ah, depuis les sols très bien drainés jusqu'aux sols à drainage mauvais. Ainsi, plus l'accumulation de la matière organique est élevée à la surface du sol minéral, plus grandes sont les quantités d'acides organiques formées, et plus importante est l'action des mécanismes de lixiviation dans les horizons Ae. Par contre, dans les sols à drainage très mauvais, la durée de submersion est très longue, et la majorité des acides organiques sont éliminés avec l'eau de la nappe phréatique. On n'observe donc pas le développement d'horizons Ae.

B) Relation entre les composés ferrugineux et alumineux et la matière organique

Des corrélations significatives sont obtenues entre Fe, Al et la matière organique totale (Cs) (tab. 3) pour l'ensemble des horizons B podzoliques supérieurs (Bf+Bhf+Bh.) Toutefois, lorsque les relations entre Fe, Al et C organique sont considérées pour chaque catégorie d'horizons, les résultats diffèrent notablement :

1. Horizons Bf

Le coefficient de corrélation entre les quantités de matière organique du sol (Cs) et de Fe extractible augmente de Fe_0 à Fe_1 , puis à Fe_2 et enfin à Fe_3 , le dithionite étant le seul réactif pour lequel la relation est significative. De plus, on note une relation non ou faiblement significative entre Fe et C organique extraits par le pyrophosphate et le tétraborate (tab. 3). Ainsi, étant donné que plus la quantité de la matière organique est élevée, plus il y a de composés ferrugineux non complexes de formés, ces derniers pourraient provenir d'une individualisation du fer des composés complexes organiques, plutôt que d'une migration et d'une accumulation de colloïdes comme suggérée par la seconde théorie de la podzolisation (FARMER, 1982). TURENNE (1975) souligne qu'au cours des processus saisonniers « polymérisation-dépolymérisation » des acides fulviques et humiques, le fer passe de l'état complexé à l'état cristallisé, et ces processus sont d'autant plus importants que les périodes d'humectation-dessiccation sont plus contrastées. C'est bien le cas des sols caractérisés par les horizons Bf étudiés ici, puisque ces sols sont très bien drainés.

En ce qui concerne l'aluminium, divers composés se forment comme en témoignent les écarts élevés entre les différents extraits (tab. 2). Mais, contrairement aux composés ferrugineux, il y a d'autant plus d'aluminium extractible par les divers réactifs que l'horizon est plus organique (tab. 3). Cet élément s'accumule sans doute sous forme de complexes comme le suggère la première théorie, puis s'individualise en différents composés liés ou non à la matière organique.

2. Horizons Bhf

Dans ces horizons où bat la nappe, les relations entre le fer des composés complexes (Fe_o et Fe_t) et la matière organique totale (Cs), ou la matière organique solubilisée par le tétraborate (Ct) et la pyrophosphate (Cp), sont très significatives (tab. 3). D'après la première théorie, on peut donc dire que les transformations en composés non complexes des composés ferrugineux complexes organiques accumulés dans les horizons B podzoliques sont ici moins importantes que dans les horizons Bf. Il est à noter que ces sols à horizons Bhf sont moins bien drainés que les précédents, et de ce fait, les périodes de dessiccation-humectation y sont moins contrastées. Toutefois, en vertu de la seconde théorie énumérée précédemment (FARMER, 1982), on peut envisager qu'une certaine quantité de composés non complexes a pu migrer jusqu'aux horizons Bhf sous la forme colloïdale, puisque l'on ne note pas de relations significatives entre le fer de l'ensemble des composés (complexes + non complexes : Fe_o et Fe_t) et la matière organique totale.

Des relations très significatives entre l'aluminium et le carbone organique sont obtenues uniquement dans le cas où les éléments sont extraits par le pyrophosphate et le tétraborate. Ceci et l'abondance des composés alumineux complexes (Al_o) et non complexes (Al_t) indiquant la coexistence de deux phases alumineuses distinctes, montrent qu'il pourrait y avoir une migration d'Al sous forme non complexe comme le suggère la seconde théorie.

Tableau 3 : Relation (r) entre Fe ou Al et C organique.

Relation (r) between Fe or Al and organic C

Fe				Al				Nature des horizons
d	o	p	t	d	o	p	t	
Fe, Al vs Cs (C organique total du sol)								
,83*	,75	,62	,12	,96*	,93*	,91**	,91**	Bf
,27	,69	,85*	,91*	,43	-,67	,67	,69	Bhf
,80**	,94*	,96*	,96*	,99*	,97*	,96*	,89*	Bh
,54*	,66*	,77*	,86*	,87*	,56*	,91*	,86*	Bf+Bhf+Bh
Fe, Al vs Cp (C extrait au pyrophosphate)								
		,69				,93*		Bf
		,84*				,93*		Bhf
		,97*				,96*		Bh
		,69*				,85*		Bf+Bhf+Bh
Fe, Al vs Ct (C extrait au tétraborate)								
			,01				,82**	Bf
			,90*				,90*	Bhf
			,99*				,98*	Bh
			,58*				,98*	Bf+Bhf+Bh

* significatif à 1%

** significatif à 5%

3. Horizons Bh

Les relations entre les formes de fer et d'aluminium extraits par les divers réactifs et la matière organique sont toutes significatives. De plus, comme les pourcentages dans le dithionite et l'oxalate sont proches de ceux obtenus par le pyrophosphate et le tétraborate (tab. 2), les composés ferrugineux et alumineux complexes se développent préférentiellement dans ces horizons. Le fait également que l'on note une diminution de l'aluminium et surtout du fer extractibles montre qu'une majeure partie de ces éléments a été évacuée par la nappe au cours de la période de submersion.

C) Evolution des composés ferrugineux et alumineux en fonction de l'humidité du sol

La position de la nappe au printemps (niveau de référence 0) ainsi que la frange capillaire au-dessus de la nappe à cette période de l'année, sont des facteurs déterminants pour la redistribution des divers composés ferrugineux et alumineux (fig. 3). Pour vérifier la possibilité que l'un ou l'autre de ces composés se développe dans les horizons B podzoliques, leurs pourcentages « relatifs » ont été reportés sur la figure 4. Pour le fer, les pourcentages sont calculés par rapport à la quantité de fer extrait par le dithionite, et pour l'aluminium, le réactif de référence est l'oxalate qui extrait davantage de composés alumineux. On peut ainsi comparer deux à deux les teneurs de fer et l'aluminium des composés dissous par les réactifs dans des horizons où le degré d'hydromorphie et les quantités réelles de fer de d'aluminium libres sont différentes.

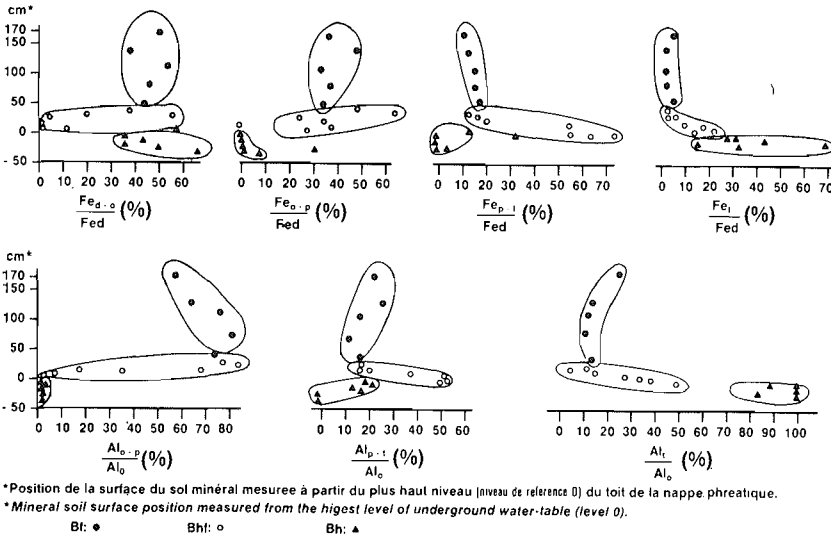


Figure 4 : Relation entre les composés de Fe et Al solubilisés par le DCB (d), l'oxalate (o), le pyrophosphate (p) et le tétraborate (t) dans les horizons B podzoliques supérieurs et la profondeur du plus haut niveau du toit de la nappe phréatique.

Evolution of Fe and Al products dissolved in DCB (d), oxalate (o), pyrophosphate (p) and tetraborate (t) as a function of underground water-table depth.

1. Horizons Bf

Dans ces horizons, le développement des composés alumineux et ferrugineux non complexes est privilégié par rapport à celui des complexes organo-minéraux. A partir de la première théorie de la podzolisation impliquant que le fer et l'aluminium migrent principalement sous forme de complexes organo-minéraux dans les sols podzolisés, on conclut que les composés complexes sont peu stables dans ces horizons, plus particulièrement les composés ferrugineux complexes peptisables par le tétraborate. Cependant, si on applique la seconde théorie, les composés non complexes qui migrent dans les horizons Bf se transforment peu en composés complexes.

2. Horizons Bhf

Dans ces horizons, les proportions des composés ferrugineux et alumineux complexes augmentent plus rapidement avec un accroissement de l'hydromorphie du sol que celles des composés ferrugineux et alumineux non complexes. Ainsi, quand l'hydromorphie du sol croît, les composés complexes ayant migré (première théorie de la podzolisation) sont plus stables, ou encore les composés non complexes ayant migré (seconde théorie de la podzolisation) sont moins stables.

3. Horizons Bh

Dans ces horizons, les proportions des composés ferrugineux non complexes bien cristallisés et celles des composés alumineux et ferrugineux complexes dissous par le tétraborate augmentent lorsque les sols sont situés plus bas dans le paysage, les proportions des composés alumineux complexes étant cependant les plus élevées. Les proportions des autres composés restent généralement faibles. Ainsi, lorsque la qualité du drainage se détériore, les composés ferrugineux sont probablement davantage évacués hors du profil, et se sont les composés alumineux complexes peptisables par le tétraborate qui sont les plus stables. S'il existe dans ces sols un déplacement du fer et de l'aluminium sous la forme de composés non complexes depuis les horizons Ae, ils sont en partie évacués hors du profil, particulièrement ceux migrant sous la forme non complexes amorphes.

CONCLUSION

Dans les horizons B podzoliques des sols étudiés dans ce travail, les relations entre le contenu en matière organique et les divers composés de fer et d'aluminium sont influencés par le degré d'hydromorphie. De plus, l'évolution des composés après leur migration vers les horizons B podzoliques est également déterminée par les conditions de drainage du site :

1) Dans les sols bien drainés, les horizons Bf ont une part prépondérante du fer sous forme de composés non complexes bien et mal cristallisés, alors que l'aluminium est sous forme à la fois de composés complexes et non complexes.

2) Le maximum de carbone organique, de fer et d'aluminium libres est observé dans les horizons Bhf localisés dans la frange d'ascension capillaire du sol, au-dessus du niveau moyen de la nappe. Le fer et l'aluminium se trouvent surtout sous forme de non complexes amorphes et de complexes.

3) Dans les sols de mauvais drainage, les horizons Bh sont caractérisés surtout par les formes complexes.

Ainsi, la présence de cette gamme de composés ferrugineux et alumineux rend difficile l'établissement d'un schéma type de leur développement dans les horizons B podzoliques. Pourtant, c'est sur un tel schéma que s'appuie la classification des horizons B podzoliques dans plusieurs systèmes de classification des sols (COMMISSION DE PEDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS, 1967 ; SOIL SURVEY STAFF,

1975 ; COMMISSION CANADIENNE DE PEDOLOGIE, 1978 ; AVERY, 1980), dans lesquels la quantité absolue ou relative du fer et de l'aluminium des composés complexes est prise en considération.

Reçu pour publication : Février 1987

Accepté pour publication : Juin 1987

NATURE OF THE Fe AND Al SUBSTANCES IN B PODZOLIC HORIZONS OF QUEBEC SOILS AS A FUNCTION OF WATER TABLE EFFECTS.

Dithionite, oxalate, pyrophosphate and tetraborate extractions of Fe and Al as well as organic carbone determinations were carried out on the upper B horizon (tab. 2) of 20 sandy soil profiles sampled in a microcatena (fig. 1). Bf, Bhf and Bh horizons developed in profiles whose mineral soil surface was more than 30 cm, between 30 and 0 cm, and less than 0 cm, respectively (tab. 1), from the spring water table level, taken as reference (fig. 2). Organic carbone and extractable sesquioxides contents increased with decreasing soil elevation above the reference level, but decreased in the soils whose soil surface was below this level (fig. 3). Relation between extractable sesquioxides and organic carbone contents depended on the nature of the horizon and the soil drainage (tab. 3). Formation of crystallised non complexes-Fe substances and amorphous non complexes-Fe and Al substances is predominant in the Bf and Bhf horizons, respectively (fig. 4). Relative quantity of tetraborate extractable complexes-Fe and Al substances increases from the well drained to the poorly drained soils. These results indicated that transformation of Fe and Al substances of podzolic origin is determined by soil humidity.

BIBLIOGRAPHIE

- ARSHAD M.A., SAINT-ARNAUD R.J. et HUANG P.M., 1972. — Dissolution of trioctahedral layer silicates by ammonium oxalate, sodium dithionite-citrate-bicarbonate, and potassium pyrophosphate. *Can. J. Soil Sci.*, 52 : 19-26.
- AVERY B.W., 1980. — Soil classification in England and Wales. *Soil Survey Technical Monograph*, No. 14. 67 p.
- BARIL R. et BITTON G., 1969. — Influence de la matière organique dans le dosage du fer, de l'aluminium et du manganèse dans les sols à l'aide du spectrophotomètre à absorption atomique. *Nat. Can.*, 96 : 725-729.
- BARIL R. et ROCHEFORT B., 1957. — Etude pédologique du comté de Lotbinière. Service des fermes expérimentales. Ministère de l'Agriculture du Canada et ministère de l'Agriculture du Québec. 115 p.
- BASCOMB C.L., 1968. — Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbone of soils of various groups. *J. Soil Sci.* 19 : 251-268.
- BERNIER B., 1960. — Observation sur le métabolisme respiratoire de quelques humus forestiers. *Contrib. n° 5. Fonds Rech. For. Univ. Laval. Québec.* 44 p.
- BRUCKERT S., 1978. — Classification des sols brun ocreux et crypto-podzoliques par analyse des extraits au tétraborate tamponné à pH 9,5. *Geoderma*, 22 : 205-212.
- BRUCKERT S. et METCHE M., 1972. — Dynamique du fer et de l'aluminium en milieu podzolique : caractérisation des complexes organo-métalliques des horizons spodiques. *Bull. ENSALA*, 14 (2) : 263-275.
- CANADIAN SOIL SURVEY COMMITTEE, 1977. — Soils of Canada. Vol. 1. Soil report. Agriculture Canada, Ottawa. 243 p.
- CHOINIERE L., 1960. — Etude pédologique du comté de Drummond. *Bulletin technique n° 7. Division des sols, Ministère de l'Agriculture du Québec.* 167 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.
- DUCHAUFFOUR Ph., 1977. — Pédogenèse et classification. Vol. 1, éd. Masson, Paris. 477 p.
- FARMER V.C., 1982. — Significance of the presence of allophane and imogolite in podzol Bs horizons for podzolization mechanisms : A review. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 28 : 571-578.
- FARMER V.C., RUSSEL J.D. et BERROW M.L., 1980. — Imogolite and proto-imogolite allophane in spodic horizons : evidence for a mobile aluminium silicate complex in podzol formation. *J. Soil Sci.*, 31 : 673-684.
- FARMER V.C., RUSSEL J.D. et SMITH B.F.L., 1983. — Extraction of inorganic forms of translocated Al, Fe and Si from a podzol Bs horizon. *J. Soil Sci.*, 34 : 571-576.
- GUILLET B. et SOUCHIER B., 1979. — Les oxyhydroxydes amorphes et cristallins dans les sols (fer, aluminium, manganèse, silicium). Dans « Constituants et propriété du sol », éd. Bonneau M. et Souchier B., Masson, Paris, 459 p.
- 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.
- JEANROY E. et GUILLET B., 1981. — The occurrence of suspended ferruginous particles in pyrophosphate extracts of some soil horizons. *Geoderma*, 26 : 95-105.
- JEANROY E., GUILLET B. et ORTIZ R., 1984. — Applications pédogénétiques de l'étude des formes du fer par les réactifs d'extraction : cas des sols brunifiés et podzolisés sur roches cristallines. *Science du Sol*, n° 3 : 199-225.
- McKEAGUE J.A., 1967. — An evaluation of 0.1M pyrophosphate and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of accumulation products in podzols and some other soils. *Can J. Soil Sci.*, 47 : 95-99.
- McKEAGUE J.A., BRYDON J.E. et MILES N.M., 1971. Differentiation of forms of extractable iron and aluminium in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35 : 33-38.
- 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 SHELDRICK B.H., 1977. — Sodium hydroxide-tetraborate in comparison with sodium pyrophosphate as an extractant of « complexes » characteristic of spodic horizons. *Geoderma*, 19 : 97-104.
- MEHRA O.P. et JACKSON M., 1960. — Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. 7th Nat. Conf. Clays Clay Min. : 317-327.
- PAWLUK S., 1972. — Measurement of crystalline and amorphous iron removal in soils. *Can. J. Soil Sci.*, 52 : 119-123.
- SCHUPPLI P.A., ROSS G.J. et McKEAGUE J.A., 1983. — The effective removal of suspended materials from pyrophosphate extracts of soils from tropical and temperate regions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 47 : 1026-1083.
- SCHWERTMANN U., 1973. — Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can J. Soil Sci.*, 53 : 244-246.
- SERVICE DE LA METEOROLOGIE, 1982. — Statistiques annuelles et mensuelles. Ministère de l'Environnement. Québec.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975. — Soil taxonomy. U.S. Dep. Agri. Handb. n° 436, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 754 p.
- TAIT J.M., YOSHINAGA N. et MITCHELL B.D., 1978. — The occurrence of imogolite in some Scottish soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 24 : 145-151.
- TAMM O., 1922. — Eine Methode zur Bestimmung der anorganischen Komponenten der Gelkomplexes im Boden. *Medd. fr. Statens Skogsforsokanstalt*, 19 : 307-404.
- TURENNE J.F., 1975. — Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse Doc. Etat, Univ. Nancy. 175 p.
- WALKLEY A. et BLACK I.A., 1934. — An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37 : 29-38.

ur l'Etude d