

Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie

Thierry Becquer, Emmanuel Bourdon et Jean Pétard

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: BX 4069 Ex: 1

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 321, série II a, n° 7
p. 585 à 592,
1995

Résumé Les quantités de nickel facilement disponible extrait par KCl M et DTPA 0,005 M + CaCl₂ 0,01 M à pH 5,3 ont été déterminées dans deux types de sols oxydiques d'une toposéquence sur péridotites. Le premier appartient à un faciès de piedmont, le second à un faciès alluvio-colluvial. Il s'avère que les quantités de Ni extraites sont pratiquement nulles dans le premier type de sol, tandis qu'elles atteignent 120 µg g⁻¹ de sol (NiDTPA) dans le second. Cette plus grande disponibilité dans le second cas peut être attribuée à 3 facteurs : (i) la teneur plus importante en goethite et l'absence d'hématite, (ii) l'existence de phénomènes d'engorgement et (iii) la présence de minéraux silicatés altérables. Une toxicité du nickel, pour des plantes non adaptées à ces milieux, est donc à craindre dans ces conditions.

Mots-clés : Nickel, Disponibilité, Sols oxydiques, Nouvelle-Calédonie, Pacifique sud.

T. B. et E. B. : ORSTOM,
Laboratoire d'Agropédologie,
BP A5, 98848 Nouméa Cedex,
Nouvelle-Calédonie ;

J. P. : ORSTOM, Laboratoire de Chimie,
BP A5, 98848 Nouméa Cedex,
Nouvelle-Calédonie ;

Adresse actuelle :
ORSTOM, Laboratoire d'Étude du
Comportement des Sols Cultivés,
BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1,
France.

Abstract Availability of nickel along a toposequence of ultramafic soils in New Caledonia

Readily available nickel concentrations extracted by KCl M and DTPA 0.005 M + CaCl₂ 0.01 M at pH 5.3 were determined for two types of oxidic soils from a toposequence on peridotite. The first soil type belongs to a piedmont formation and the second is of alluvio-colluvial origin. Results indicate that the quantities of nickel extracted are nearly non-existent in the first soil type but may attain 120 µg g⁻¹ (NiDTPA) in the second. The greater availability of nickel in the second case may be attributed to 3 factors: (i) a greater abundance of goethite and an absence of haematite, (ii) the existence of reducing conditions and (iii) the presence of weatherable silicate minerals. Nickel phytotoxicity may have a detrimental effect on plants not adapted to these edaphic conditions.

Keywords: Nickel, Availability, Oxidic soils, New-Caledonia, South Pacific.

Abridged
English
Version

THE toxic effect of nickel has been well known for a long time (Haselhoff, 1893). Therefore, despite the high content of nickel in ophiolitic derived soils, its possible toxic effect is toned down because either nickel is contained in minerals resistant to weathering or it is practically immobile at the Eh-pH conditions of the soils (Angelone *et al.*, 1993). Among these, oxidic soils (Acrothox) (USDA, 1975) found on ultramafic massifs in New Caledonia contain very high levels of nickel which partly explain the biological and

ecological particularities of these ecosystems (Whittaker *et al.*, 1954 ; Proctor and Woodell, 1975 ; Jaffré, 1980 ; Brooks, 1987). The presence of native plant species capable of accumulating nickel (Jaffré and Schmid, 1974 ; Jaffré *et al.*, 1976) or reduce its harmful effect due to physiological adaptations (Kersten *et al.*, 1980) points to its bioavailability. The establishment of agriculture on these soils may be hindered by the extreme sensitivity of crop plants to nickel (Sauerbeck and Hein, 1991 ; L'Huillier, 1994). The objective of this study is

Note

présentée par
Georges Pedro.

remise le 24 mai 1995,
acceptée après révision
le 27 juin 1995.



to evaluate the availability of nickel on different edaphic formations of a toposequence representative of these conditions.

MATERIALS AND METHODS

The availability of nickel was evaluated by two extractant methods: (i) KCL 1 M (NiKCl) and (ii) DTPA 0.005 M + CaCl₂ 0.01 M buffered to pH 5.3 (Lindsay and Norvell, 1978 modified) (NiDTPA). The first method allows for the extraction of exchangeable cations at the soil pH (Rouiller *et al.*, 1980), and the second is considered as the ideal chelating agent for evaluating the availability of nickel for plants.

PEDOLOGICAL CONDITIONS

The toposequence studied (fig. 2) is composed of an upper piedmont substrate and a lower edaphic formation derived from alluvio-colluvial material. The morphology (fig. 3) of the piedmont sequence consists of very compact loamy sand horizons (profile OUE 1 and OUE 2 beyond 55 cm in depth) and variable textured colluvial material occurring in successive horizons of irregular thickness. Profile OUE 4 contains a greater abundance of ferromanganese spots that suggests the existence of hydromorphic phenomena at the base of the toposequence. However, the ensemble of soils studied are geochemically homogeneous (table). The levels of NiO in the toposequence show little variation with mean values of 0.95% NiO in piedmont substrates and 1.09% in colluvial horizons. Silica levels are notably higher in colluvial horizons (6-15%) than in piedmont formations (1-3%).

RESULTS

For similar total nickel concentrations (approximately 1% NiO), the levels of NiKCl and NiDTPA (fig. 4) are relatively weak with 0 to 1 µg g⁻¹ and 0 to 4 µg g⁻¹ respectively for piedmont substrates. Higher concentrations of nickel are found in surface horizons of the alluvial terrace formation which contains 60 to 120 µg g⁻¹. The organic content has an important influence as highlighted by the correla-

tions between levels of carbon and NiKCl or NiDTPA ($r^2 = 0.70$ and 0.71). However, the role of organic content gives no explanation for the low availability of nickel in horizons of piedmont substrate where carbon levels may attain 20-25% at the surface.

DISCUSSION

In these soils, nickel is essentially associated with iron oxides (Nalovic and Quantin, 1972 ; Schwertmann and Latham, 1986). Whilst alluvial terrace soils contain only goethite ferritization is more intense in piedmont soils and induces the formation of haematite. Nickel might be more mobilizeable from goethite because in analogue soils, (i) we extract more nickel by CBD (Citrate-Bicarbonate-Dithionite) from samples containing only goethite (0.96 to 2.16% Ni) than those containing both goethite and haematite (0.23 to 1% Ni), and (ii) the surface area of goethite is more important than that for haematite (63 to 121 m² g⁻¹ and 41 to 74 m² g⁻¹ respectively). Moreover, the temporary reducing conditions observed in the alluvial terrace might increase the rate of dissolution of iron oxides (Schwertmann, 1991). In addition, the presence of a fraction of readily alterable silicate mineral in the colluvium may equally become a source of mobilizeable nickel.

CONCLUSION

In the piedmont zone, characterized by the presence of very old material, extractable nickel is nearly non-existent. At the base of the piedmont and on the alluvial terrace, three mechanisms acting together may explain the greater mobility of nickel : (i) the existence of material richer in goethite ; (ii) the existence of a temporary reducing conditions ; (iii) the presence of alterable minerals. In this last formation, the accumulation of available nickel in the surface organic horizons may induce toxicity problems in plants not adapted to this substrate.

INTRODUCTION

L'effet phytotoxique du nickel est connu depuis longtemps (Haselhoff, 1893). Toute-

fois, cet effet est parfois mis en doute dans les sols naturellement riches en nickel, car ce dernier est essentiellement inclus dans des minéraux résistants à l'altération et il est, en

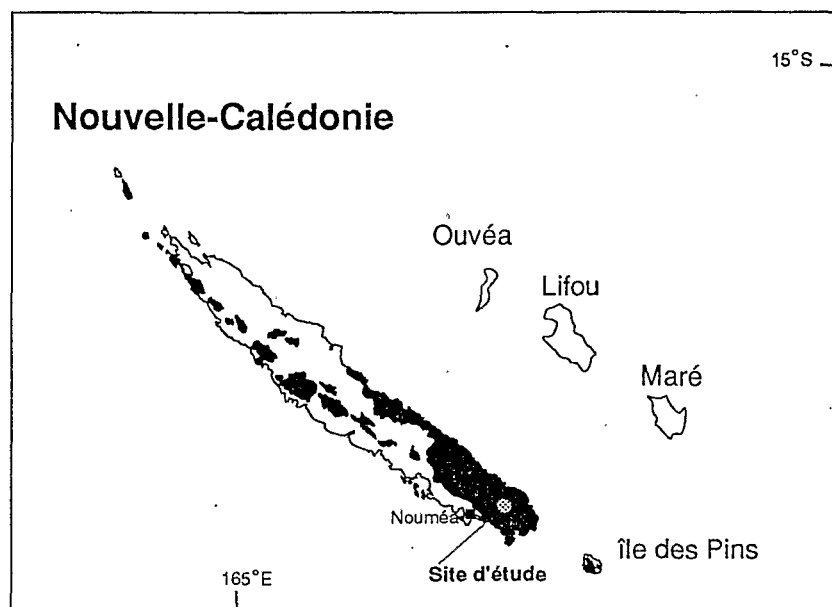
outre, peu mobile dans les conditions de pH-Eh des sols (Angelone *et al.*, 1993). Le nickel ne se trouverait pas, alors, dans le sol sous forme disponible pour les plantes. Les sols oxydiques (ferrallisols) développés sur les massifs de roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie ont des teneurs extrêmes de nickel, de l'ordre de 1 %, ainsi que des concentrations très élevées de fer, pouvant atteindre 70-75 % de Fe_2O_3 , et de certains métaux (Cr, Co, Mn) (Trescases, 1975 ; Latham, 1985). L'originalité de la flore de ces milieux (Whittaker *et al.*, 1954 ; Proctor et Woodell, 1975 ; Jaffré, 1980 ; Brooks, 1987) est en grande partie liée à la spécificité des sols. L'existence d'espèces naturelles capables d'accumuler le nickel (Jaffré et Schmid, 1974 ; Jaffré *et al.*, 1976) ou de limiter son influence grâce à des adaptations physiologiques (Kersten *et al.*, 1980) incite, toutefois, à penser que, dans ces milieux, le nickel peut être biodisponible. La volonté de développer des cultures maraîchères et fruitières sur ces sols nécessite donc de pouvoir évaluer la disponibilité du nickel dans les différents faciès utilisables, les espèces cultivées pouvant être extrêmement sensibles au nickel même à des doses très faibles (Sauerbeck et Hein, 1991 ; L'Huillier, 1994).

Nous avons donc été amenés, (i) à étudier les variations pédologiques existant dans une toposéquence représentative des sols de ces milieux et (ii) à évaluer la disponibilité du nickel dans les différents faciès de sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La toposéquence étudiée, située dans la station forestière de Ouénarou (coordonnées : E 166°44' - S 22°8'), a été choisie à partir des résultats des études cartographiques menées préalablement (Bourdon et Becquer, 1992 ; Bourdon *et al.*, 1993).

Des échantillons de sol ont été prélevés dans chacun des horizons des profils de sol, séchés à l'air, tamisés à 2 mm et analysés. La granulométrie est déterminée par la méthode de la pipette. Le carbone organique est dosé par titrage selon la méthode de Walkley et Black (1934). Le pH est mesuré dans une suspension de sol dans de l'eau



(pHH₂O) ou du KCl M (pHKCl) dans un rapport 1 : 2,5. Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique sont déterminées par la méthode de Tucker (1954 modifiée, à pH 7,0). Les éléments totaux sont dosés par spectrométrie d'absorption atomique après attaque perchlorique.

Pour étudier la disponibilité du nickel, deux extractants ont été employés : (i) le KCl 1 M (NiKCl) [5 g de sol sont agités dans 50 ml de solution de KCl 1 M, filtrés et dosés par spectrométrie d'absorption atomique en flamme] et (ii) le DTPA 0,005 M + CaCl₂ 0,01 M tamponné à pH 5,3 (Lindsay et Norvell, 1978, modifié) (NiDTPA) [5 g de sol sont agités avec 25 ml de solution de DTPA 0,005 M + CaCl₂ 0,01 M tamponnée à pH 5,3 pendant 1 h, centrifugés à 2 000 tr mn⁻¹ pendant 15 mn, filtrés et dosés comme précédemment].

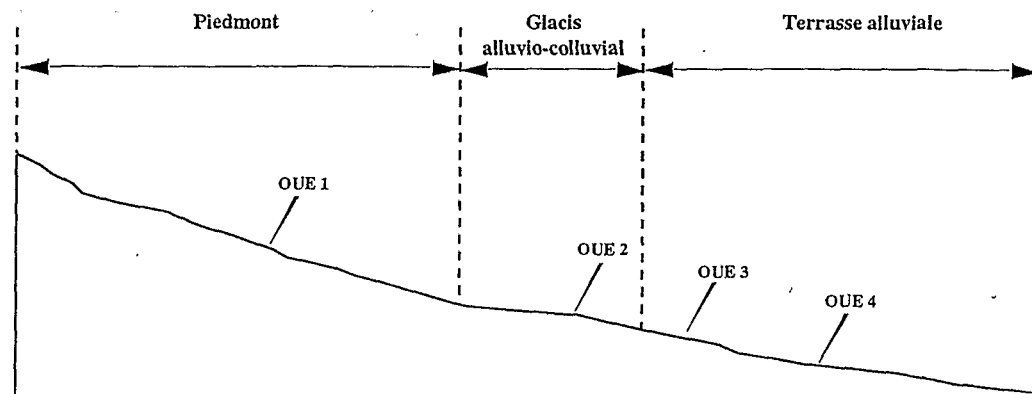
Parmi les deux extractants utilisés, le premier (KCl) permet d'extraire les cations échangeables au pH du sol (Rouiller *et al.*, 1980), le second (DTPA) est considéré comme l'agent chélatant le mieux adapté pour évaluer la biodisponibilité de différents métaux, tels que Ni, Cu, Zn, Cd, pour les plantes (Lindsay et Norvell, 1978 ; Baker et Amacher, 1982). Le pH a été tamponné à 5,3 au lieu de 7,3, la Triethanolamine (TEA)

Fig. 1 Carte de situation des massifs de roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie et localisation de la zone d'étude.

Map of the ultramafic massifs in New Caledonia and location of the study zone.

Fig. 2 Localisation des profils et des différents faciès de sol dans la toposéquence.

Location of soil profiles and the different edaphic formations of the toposequence.



n'étant plus utilisée, contrairement à la méthode de Lindsay et Norvell (1978), afin de nous rapprocher des conditions de pH de nos sols. Des tests préalables, sur différents sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie, avaient toutefois montré une excellente corrélation entre deux extractions réalisées à pH 5,3 et pH 7,3 ($Ni_{pH7,3} = 0,6 Ni_{pH5,3} - 2,68$; $r^2 = 0,99$). On note toutefois que le nickel extractible diminue de façon sensible avec l'augmentation du pH.

CONDITIONS PÉDOLOGIQUES

La toposéquence étudiée, qui s'est développée sur un massif de péridotites (fig. 1), se compose en amont d'un piedmont, en aval d'une terrasse alluviale et, faisant la transition entre les deux, d'un glacis alluvio-colluvial (fig. 2). Quatre profils représentatifs des sols de la toposéquence ont été décrits (fig. 3) et analysés (tableau). D'un point de vue morphologique, on peut différencier deux types d'horizons : d'une part, les horizons très compacts, limono-sableux du piedmont (profil OUE 1 et OUE 2 au-delà de 55 cm de profondeur) et, d'autre part, les horizons colluvio-alluviaux constitués d'une succession d'apports, d'épaisseur plus ou moins aléatoire, de texture parfois très limono-argileuse, parfois sableuse (profils OUE 2 de 0 à 55 cm de profondeur, OUE 3 et OUE 4). Dans l'ensemble du profil OUE 4, on distingue de plus de nombreux volumes ferro-manganiques qui témoignent

de l'existence de phénomènes d'engorgement dans le bas de la toposéquence. L'ensemble présente cependant une assez grande homogénéité géochimique. Les teneurs en Fe_2O_3 sont toujours supérieures à 50 %. Celles de NiO varient peu dans le profil, les horizons de piedmont étant légèrement appauvris par rapport aux matériaux d'apport, avec des teneurs moyennes respectives de 0,95 et 1,09 % de NiO. La seule différence notable concerne la teneur en silicates, qui varie de 6 à 15 % dans les horizons d'apports, alors qu'elle est toujours inférieure à 3 % dans les horizons de piedmont. Ceci est le signe d'une altération moins poussée des matériaux d'apports.

RÉSULTATS

Les résultats des extractions de nickel par KCl et DTPA sont présentés dans la figure 4. Ils montrent que, pour des teneurs similaires en nickel total (environ 1 % de NiO), les teneurs en NiKCl et NiDTPA sont très faibles sur piedmont, respectivement de 0 à $1 \mu g g^{-1}$ et 0 à $4 \mu g g^{-1}$ de sol, alors qu'elles peuvent atteindre respectivement 60 et $120 \mu g g^{-1}$ de sol dans les horizons de surface de la terrasse alluviale. Les corrélations entre la teneur en carbone et NiKCl ou NiDTPA ($r^2 = 0,70$ et $0,71$), ainsi que l'accumulation de nickel extractible dans les horizons de surface, montrent le rôle important joué par la matière organique, l'essentiel de la capacité d'échange cationique étant lié à la phase organique dans ces sols. Cependant, dans les

Tableau Caractérisation de quelques propriétés physico-chimiques des différents horizons des profils de sol.
 Several physical and chemical properties of different horizons found in the soil profiles.

	Profondeur (cm)	Granulométrie			C (g kg ⁻¹)	pH		Bases échangeables				Charge nette à pH 7 (*)	Éléments totaux		
		A+LF	LG+SF	SG+G		H ₂ O	KCl	Ca	Mg	K	Na		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	NiO
		(%)					(cmol.kg ⁻¹)				(%)				
OUE 1	0-5	70,5	11,9	17,6	27,4	4,6	5,1	0,3	0,3	0,1	0,1	4,8	2,2	62,3	0,8
	5-20	73,3	15,5	11,2	20,7	4,6	5,5	0,1	0,1	0,0	0,1	1,6	2,2	62,4	0,9
	23-33	25,0	53,2	21,8	4,5	4,7	5,8	0,0	0,0	0,1	0,1	-4,1	2,1	64,0	1,0
	38-57	64,1	13,7	22,2	1,7	4,8	5,8	0,1	0,2	0,1	0,1	-4,2	1,7	64,8	0,9
	68-58	50,5	24,8	24,6	0,4	4,5	5,8						1,8	65,4	0,8
OUE 2	0-5	59,4	7,2	33,4	24,6	5,3	5,6	1,5	1,1	0,2	0,1	5,2	4,6	61,0	1,0
	7-17	68,9	14,1	17,0	25,0	4,8	5,5	0,2	1,1	0,1	0,1	4,4	5,8	58,6	1,1
	14-34	39,9	35,0	25,1	4,0	5,1	6,5	0,1	0,9	0,0	0,1	0,5	7,5	56,3	1,1
	40-54	57,2	19,8	23,0	4,9	5,4	6,7	0,2	1,0	0,0	0,0	1,4	8,8	53,9	1,1
	58-62	62,0	15,5	22,5	7,3	5,1	6,7						1,6	67,0	0,8
	67-80	71,8	12,3	15,9	9,1	4,9	6,7						1,9	66,1	1,0
	98-100	61,5	25,4	13,1	0,4	4,9	6,8						2,8	65,4	1,4
OUE 3	0-4	76,9	17,5	5,6	34,1	5,1	5,1	2,8	1,8	0,2	0,1	12,8	9,1	53,9	1,2
	4-10	83,2	11,7	5,2	29,0	4,9	5,2	1,1	1,2	0,1	0,1	8,1	7,9	54,5	1,2
	18-27	54,2	42,9	2,9	11,7	5,0	6,0	0,1	0,3	0,2	0,1	2,9	5,5	56,8	1,3
	40-51	72,0	14,7	13,4	13,7	5,0	6,1	0,0	0,4	0,0	0,0	-1,2	7,5	52,1	1,1
	60-74	54,0	22,1	23,9	3,2	5,1	6,6						5,9	53,9	1,1
	83-96	66,1	27,5	6,4	10,0	5,2	6,5						5,0	59,6	1,3
>110	52,0	45,9	2,1	3,3	5,5	6,7						3,9	55,7	1,1	
OUE 4	0-4	78,7	13,2	8,1	47,2	4,6	4,7	0,9	1,1	0,2	0,1	11,2	7,3	56,3	1,2
	8-9	82,9	10,1	7,0	32,1	4,7	5,4	0,1	0,5	0,1	0,1	6,2	5,4	60,0	1,2
	26-39	33,9	27,0	39,0	10,4	5,0	6,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	4,2	57,9	1,0
	49-67	30,8	52,8	16,4	7,1	5,1	6,5						4,1	52,3	1,0
	74-80	16,8	17,6	65,6	5,3	4,8	6,2						0,9	64,9	0,4

(*) les valeurs négatives correspondent à un excès de charges positives lié aux oxy-hydroxydes de fer.

horizons de surface du piedmont, malgré des teneurs en carbone de 20-25 g kg⁻¹, les teneurs en nickel extractible restent proches de zéro. L'action de la matière organique semble donc insuffisante pour expliquer à elle seule la disponibilité du nickel.

DISCUSSION

Des études antérieures (Nalovic et Quantin, 1972 ; Schwertmann et Latham, 1986) ont montré que, dans ces sols, le nickel est essentiellement lié aux oxydes de fer. Les teneurs légèrement plus importantes en Fe₂O₃ sur le piedmont ne semblent pas suffisantes pour expliquer la différence de mobilité entre les faciès de sol. Les études réalisées sur les massifs du Boulinda et de la Tiébaghi (Latham, 1985), ont montré que

les sols de piedmont, qui ont subi une ferritisation plus intense, ont une teneur en hématite relativement importante, notamment vers le sommet des profils, alors qu'elle est généralement nulle dans les sols de terrasses alluviales. Or, sur les échantillons de terre fine de l'étude de Schwertmann et Latham (1986), on observe que (i) l'on extrait plus de nickel par le CBD (Citrate-Bicarbonate-Dithionite) des échantillons contenant uniquement de la goethite (0,96 à 2,16 % de Ni) que de ceux contenant à la fois de la goethite et de l'hématite (0,23 à 1 % de Ni) et (ii) la surface spécifique de la goethite est plus importante que celle de l'hématite (respectivement de 63 à 121 m² g⁻¹ et 41 à 74 m² g⁻¹). La présence d'oxydes de fer dans des formes où le Ni serait facilement mobilisable pourrait, en partie, expliquer la plus

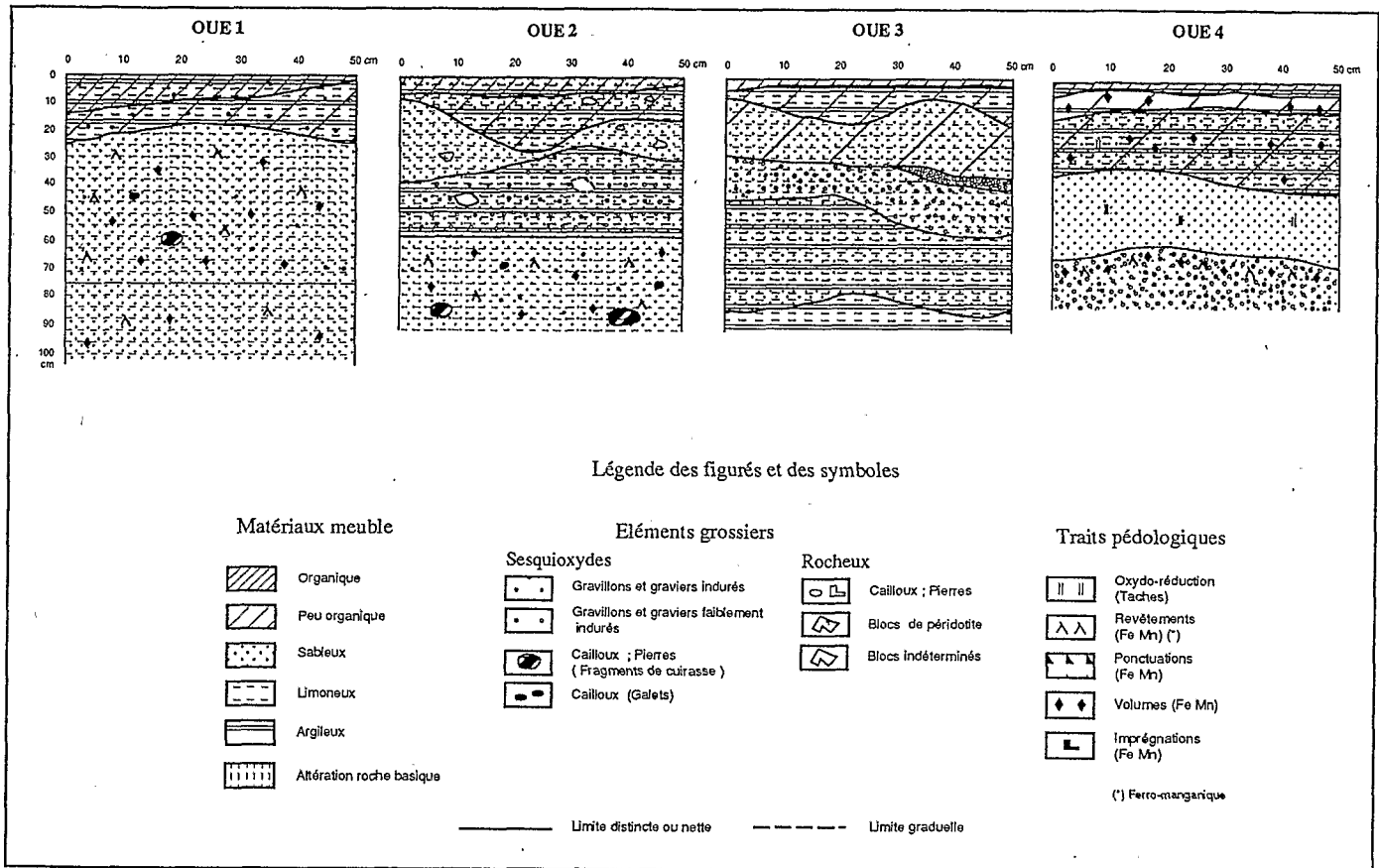


Fig. 3 Description morphologique des profils pédologiques.

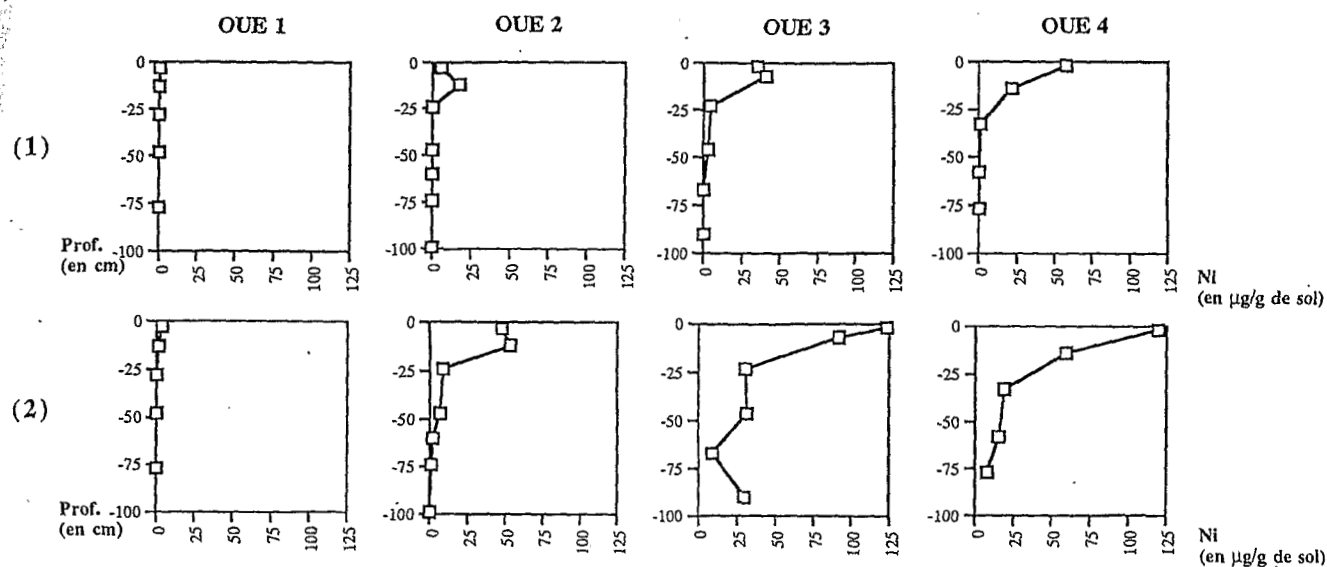
Morphological description of soil profiles.

grande efficacité du DTPA sur les sols d'apport. Par ailleurs, l'engorgement temporaire observé dans la terrasse alluviale (notamment au niveau du profil OUE 4) pourrait induire une réduction du Fe(III) en Fe(II). La vitesse de dissolution des oxydes de fer serait alors fortement augmentée, celle de la goethite pouvant être multipliée par un facteur 100 dans ces conditions (Schwertmann, 1991). De plus, la présence d'une fraction non négligeable de minéraux silicatés assez altérables (notamment des talcs nickelifères, résultats non présentés), dans les matériaux d'apport, pourrait également intervenir comme source de nickel facilement mobilisable. Le nickel libéré lors de la dissolution des oxydes de fer ou de l'altération des minéraux silicatés pourrait alors s'accumuler, après remontée biologique, dans les horizons de surface de la zone de terrasse alluviale, le caractère plus

humifère de cette zone accentuant le phénomène.

CONCLUSION

Au niveau de la toposéquence étudiée, les extractions de nickel par le KCl et le DTPA font apparaître des divergences importantes entre les différents faciès de sols ferrallitiques ferritiques. Dans la zone de piedmont, caractérisée par la présence de matériaux très évolués, le nickel extrait est pratiquement nul. Au niveau du glacis et de la terrasse alluviale la disponibilité du nickel est nettement plus importante. Trois mécanismes peuvent agir conjointement pour expliquer la plus grande mobilité du nickel : (i) l'existence de matériaux plus riches en goethite, cette dernière ayant généralement une teneur plus élevée en nickel et étant plus réactive du fait de sa plus grande sur-



face spécifique ; (ii) l'existence d'un engorgement temporaire, de plus en plus accentué vers le bas de la toposéquence, pouvant induire la réduction des oxy-hydroxydes de fer ; (iii) la présence de minéraux silicatés susceptibles de libérer du nickel. Dans ce dernier faciès, le prélèvement par les plantes

du nickel qui a été solubilisé, puis son retour au sol sous forme de litière, conduit à son accumulation dans les horizons humifères. Cette accumulation de nickel facilement biodisponible pourrait induire des problèmes de toxicité sur des plantes non adaptées à ces milieux.

Remerciements : Les auteurs remercient MM. T. Jaffré et A. Herbillon pour leurs suggestions lors de la rédaction de cette Note, ainsi que la Province Sud de Nouvelle-Calédonie pour l'aide financière apportée dans le cadre de la Convention de recherche entre la Province Sud et l'ORSTOM pour l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre.

ANGELONE, M., VASELLI, O., BINI, C. et CORADOSSI, N., 1993. Pedogeochemical evolution and trace elements availability to plants in ophiolitic soils, *The Science of the Total Environment*, 129, p. 291-309.

BAKER, D. E. et AMACHER, M. C., 1982. Nickel, copper, zinc, and cadmium, A. L. Page, R. H. Miller et D. R. Keeney, *Methods of soil analysis*, Part 2, 2nd ed., Soil Sci. Soc. of Am., Madison, WI, p. 323-336.

BOURDON, E. et BECQUER, T., 1992. *Étude préliminaire de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembi*, Nouméa : ORSTOM. Conv. : Sci. Vie : Agropédol., 12, 19 p., multigr.

BOURDON, E., BECQUER, T. et TORTELIER, M. C., 1993. *Mise en valeur des sols des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Étude de l'organisation des sols : bassin amont de la rivière des Pirogues*, Nouméa : ORSTOM. Conv. : Sci. Vie : Agropédol., 19, 72 p., multigr.

BROOKS, R. R., 1987. *Serpentine and its vegetation : a multidisciplinary approach*, Diocorides Press, Portland, OR, 454 p.

HASELHOFF, E., 1893. Versuche über die schädliche Wirkung von nickel-haltigem Wasser auf Pflanzen, *Landw. Jahrb.*, 22, p. 1862-1868.

JAFFRÉ, T., 1980. *Végétation des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie*, Travaux et Documents, ORSTOM, 124, 275 p.

JAFFRÉ, T., BROOKS, R. R., LEE, J. et REEVES, R. D., 1976. *Sebertia acuminata*: a hyperaccumulator of nickel from New Caledonia, *Science*, 193, p. 579-580.

JAFFRÉ, T. et SCHMID, M., 1974. Accumulation du nickel par une rubiacée de Nouvelle-Calédonie, *Psychotria douarrei* (G. Beauvisage) Däniker, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 278, série D, p. 1727-1730.

KERSTEN, W. J., BROOKS, R. R., REEVES, R. D. et JAFFRÉ, T., 1980. Nature of nickel complexes in *Psychotria douarrei* and other nickel-accumulating plants, *Phytochemistry*, 19, p. 1963-1965.

Fig. 4 Disponibilité du nickel dans les différents profils de sol à la suite d'une extraction par (1) du KCl M et (2) du DTPA 0,005 M + CaCl₂ 0,01 M à pH 5,3.

The availability of nickel in the different soil profiles following extraction by (1) KCl M and (2) DTPA 0.005 M + CaCl₂ 0.01 M at pH 5.3.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- LATHAM, M., 1985. Altération et pédogenèse sur roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. Genèse et évolution des accumulations du fer et de silice en relations avec la formation du modelé, *Thèse Sc.*, Université de Dijon, 331 p.
- L'HUILLIER, L., 1994. Biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques de Ni sur le développement et la physiologie du maïs, *Thèse*, Université de Montpellier-II, 249 p.
- LINDSAY, W. L. et NORVELL, W. A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, p. 421-428.
- NALOVIC, Lj et QUANTIN, P., 1972. Évolution géochimique de quelques éléments majeurs et traces dans un sol ferrallitique ferritique de Nouvelle-Calédonie issu de péridotites. Interprétation d'observations à l'aide de la microsonde de Castaing, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, X, p. 389-410.
- PROCTOR, J. et WOODÉLL, S. R. J., 1975. The ecology of Serpentine Soils, *Adv. Ecol. Res.*, 9, p. 255-366.
- ROUILLER, J., GUILLET, B. et BRUCKERT, S., 1980. Cations acides échangeables et acidités de surface : approche analytique et incidences pédogénétiques, *Science du Sol*, 2, p. 161-175.
- SAUERBECK, D. et HEIN, A., 1991. The nickel uptake from different soils and its prediction by chemical extractions, *Water, Air and Soil Pollution*, 57-58, p. 861-871.
- SCHWERTMANN, U., 1991. Solubility and dissolution of iron oxides, *Plant and Soil*, 130, p. 1-25.
- SCHWERTMANN, U. et LATHAM, M., 1986. Properties of iron oxides in some New Caledonian oxisols, *Geoderma*, 39, p. 105-123.
- TRESCASES, J. J., 1975. *L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie*, Mém. ORSTOM, 78, 259 p.
- TUCKER, B. M., 1954. The determination of exchangeable calcium and magnesium in carbonate soils, *Aust. J. Agric. Res.*, 5, p. 706-715.
- USDA, 1975. Soil Taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. US. Dept. Agric. A and B, 436 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 Science*, 37, p. 29-38.
- WHITTAKER, R. H., WALKER, R. B. et KRUCKERBERG, A. R., 1954. The ecology of serpentine Soils : a symposium, *Ecology*, 35 (2), p. 258-288.