

# Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie

T. BECQUER, E. BOURDON et L. L'HUILLIER

Laboratoire d'Agropédologie, Centre ORSTOM, BP A 5, 98848, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

## Résumé

Les teneurs élevées en nickel des sols ferrallitiques ferritiques du Sud de Nouvelle-Calédonie font craindre des problèmes de toxicité pour les plantes cultivées. Une étude visant à évaluer la disponibilité du nickel dans ces sols a donc été réalisée sur les principaux faciès de sols utilisables pour l'agriculture.

Des extractions chimiques ont été réalisées avec KCl 1M (Ni KCl) et DTPA 0,005M + CaCl<sub>2</sub> 0,01M à pH 5,3 (Ni DTPA) dans divers profils d'une toposéquence de sols sous végétation naturelle afin d'évaluer la disponibilité du nickel. Elles montrent que pour des teneurs similaires en nickel total (environ 1 % de NiO), les teneurs en Ni KCl et Ni DTPA sont très faibles sur piedmont, respectivement de 0 à 2 µg g<sup>-1</sup> et 0 à 8 µg g<sup>-1</sup> de sol, alors qu'elles peuvent atteindre 120 µg g<sup>-1</sup> dans les horizons de surface des faciès alluvio-colluviaux.

Par ailleurs, des solutions de sol ont été prélevées sur la même toposéquence et sous une parcelle d'essais. Elles ont en outre permis de calculer un indice de toxicité (Itox<sub>Ni</sub>) à partir de la composition des solutions du sol :  $Itox_{Ni} = \frac{[Ni^{2+}]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} * 100$ . La concentration de Ni et Itox<sub>Ni</sub> varient en relation avec les caractéristiques pédologiques des sols et avec les pratiques culturales, notamment les apports de fertilisants azotés ou d'amendements minéraux (P, Si) ou organiques.

Des problèmes de toxicité sur des plantes cultivées, non adaptées à ces milieux, sont à craindre sur les faciès colluvio-alluviaux notamment à la suite d'apports de fertilisants azotés ou d'amendements minéraux.

## Introduction

Les écosystèmes développés sur roches ultramafiques ont été largement étudiés en raison des particularités biologiques et écologiques qu'ils présentent (Whittaker *et al.* 1954 ; Proctor & Woodell 1975 ; Jaffré 1980 ; Brooks 1987). Outre ces intérêts, ces milieux présentent en Nouvelle-Calédonie un intérêt agronomique du fait de leur extension importante, de l'ordre de 30 % de la surface totale du Territoire (Bonzon *et al.* 1997). La spécificité des sols, en particulier les teneurs très élevées en certains métaux, notamment en nickel (Ni) et en fer (Trescases 1975 ; Latham 1985), est souvent mise en cause pour expliquer la faible fertilité du milieu et l'originalité de la flore. L'effet phytotoxique du nickel est connu depuis longtemps (Haselhoff 1893), et les plantes cultivées y sont particulièrement sensibles. Il est donc important de pouvoir évaluer les risques de toxicité liés au Ni dans ces milieux.

Deux voies complémentaires de

recherche peuvent être envisagées. La première consiste à évaluer la toxicité du Ni au niveau des plantes (L'Huillier 1996, 1997 ; Edighoffer 1997). Cette voie est difficile du fait de l'absence de symptômes très caractéristiques pour des intoxications modérées et du manque de connaissance concernant les seuils de toxicité. De plus, d'importantes différences de sensibilité existent selon les espèces, voire même selon les cultivars. La seconde, qui a été suivie dans ce travail, consiste à évaluer la disponibilité du Ni au niveau des sols.

Les prélèvements de métaux par les plantes sont généralement très faiblement corrélés avec la teneur totale du métal dans le sol. De nombreuses études ont donc été réalisées avec comme objectif de définir une fraction de nickel biodisponible. Des extractants chimiques variés (divers sels, des acides dilués, des complexants...) ont été employés pour quantifier les fractions du sol les plus réactives (Juste 1988 ; Uren 1992).

En fait, les plantes prélèvent généralement les métaux sous forme d'ions métalliques libres dans la solution du sol. Ces études, bien qu'encore peu nombreuses sur ce type de sol (Anderson *et al.* 1973 ; Proctor *et al.* 1981 ; Gasser *et al.* 1994), peuvent apporter des renseignements importants sur la qualité des solutions au contact des racines. Toutefois, la concentration d'un élément est généralement insuffisante pour expliquer, à elle seule, les problèmes d'intoxication. En particulier, dans le cas du Ni, la présence de calcium et de magnésium dans la solution du sol est connue pour limiter son effet toxique (Proctor & Mc Gowan 1976 ; Robertson 1985). Un indice de toxicité du Ni,  $Itox_{Ni}$ , a été proposé par L'Huillier (1994), par analogie à celui proposé pour l'aluminium (Becquer *et al.* 1992), afin de prendre en compte à la fois les effets néfastes du Ni et les effets bénéfiques du calcium (Ca) et du magnésium (Mg). Sa formule est le rapport des activités molaires de  $Ni^{2+}$  par rapport à  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  :

$$Itox_{Ni} = \frac{\{Ni^{2+}\}}{\{Ca^{2+}\} + \{Mg^{2+}\}} \times 100$$

En première approximation, dans la gamme de pH des solutions du sol et en absence de prise en compte de la matière organique soluble, les concentrations ioniques peuvent être utilisées à la place des activités. En culture hydroponique de plantules de maïs, sur eau pure

et sur solution de Hoagland diluée de 2 à 20 fois, une baisse de croissance racinaire de 10 % a été observée, pour  $Itox_{Ni} = 2,3 \pm 0,3$  et de 50 % pour  $Itox_{Ni} = 4,4 \pm 0,6$  (L'Huillier 1994).

Les objectifs de cette étude sont donc : 1) d'évaluer la disponibilité du nickel dans différents faciès de sols ferrallitiques ferritiques à l'aide d'extractants chimiques sélectifs, 2) de comparer ces résultats avec la composition des solutions du sol prélevées dans les mêmes faciès, 3) de tester l'intérêt de l'indice de toxicité proposé.

### Évaluation de la disponibilité du nickel à l'aide d'extractions chimiques sélectives.

Ces recherches ont été menées sur les sols décrits précédemment (Bourdon *et al.* 1997 ; Quantin *et al.* 1997) pour leurs caractéristiques morphologiques, physiques et minéralogiques. Quatre profils sous végétation naturelle (OUE 1, OUE 2, OUE 3, OUE 4) correspondant à 3 faciès (piedmonts, glacis colluvio-alluvial, terrasse alluviale) ont été analysés. Les caractéristiques physico-chimiques principales de ces sols sont présentées dans le tableau 1.

Pour étudier la disponibilité du nickel, deux extractants ont été employés (Becquer *et al.* 1995) : 1) le KCl 1 M (noté Ni KCl), 2) le DTPA 0,005 M +  $CaCl_2$  0,01 M tamponnée à pH 5,3 (noté Ni DTPA).

Alors que les teneurs en nickel total sont d'environ 1 % de NiO dans l'ensemble de

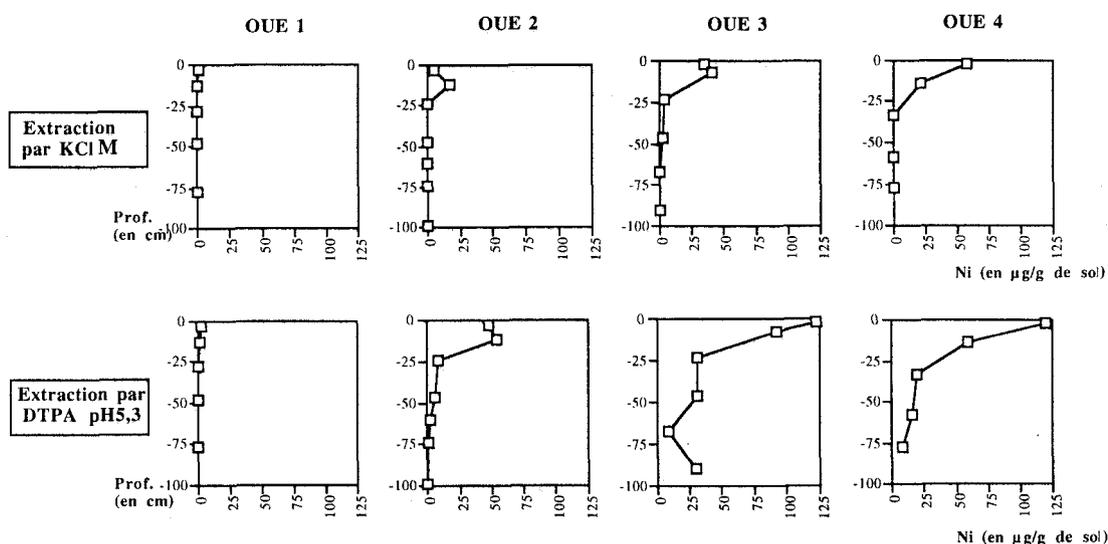


Fig. 1 Extractibilité du nickel, dans les différents profils de sol, par KCl 1 M et DTPA 0,005 M +  $CaCl_2$  0,01 M à pH 5,3.

**Tableau 1** Caractéristiques chimiques principales des profils de sol de la toposéquence

	Prof. (cm)	C (g kg <sup>-1</sup> )	pH		Bases échangeables (cmol kg <sup>-1</sup> )				Somme des bases (cmol kg <sup>-1</sup> )	Charge nette à pH 7 (1)	Éléments totaux (%)			
			H <sub>2</sub> O	KCl	Ca	Mg	K	Na			SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO
OUE 1	0 - 5	27,4	4,6	5,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,7	4,8	2,2	0,4	62,3	0,8
	5 - 20	20,4	4,6	5,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1,6	2,2	0,4	62,4	0,9
	23 - 33	4,5	4,7	5,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	-4,1	2,1	0,3	64,0	1,0
	38 - 57	1,7	4,8	5,8	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	-4,2	1,7	0,3	64,8	0,9
	68 - 85	0,4	4,5	5,8							1,8	0,3	65,4	0,8
OUE 2	0 - 5	24,6	5,3	5,6	1,5	1,1	0,2	0,1	2,9	5,2	4,6	0,6	61,0	1,0
	7 - 17	25,0	4,8	5,5	0,2	1,1	0,1	0,1	1,4	4,4	5,8	0,7	58,6	1,1
	14 - 34	4,0	5,1	6,5	0,1	0,9	0,0	0,1	1,1	0,5	7,5	0,9	56,3	1,1
	40 - 54	4,9	5,4	6,7	0,2	1,0	0,0	0,0	1,3	1,4	8,8	1,0	53,9	1,1
	58 - 62	7,3	5,1	6,7							1,6	0,3	67,0	0,8
	67 - 80	9,1	4,9	6,7							1,9	0,3	66,1	1,0
OUE 3	98 - 100	0,4	4,9	6,8							2,8	0,4	65,4	1,4
OUE 3	0 - 4	34,1	5,1	5,1	2,8	1,8	0,2	0,1	5,0	12,8	9,1	0,8	53,9	1,2
	4 - 10	29,0	4,9	5,2	1,1	1,2	0,1	0,1	2,5	8,1	7,9	0,7	54,5	1,2
	18 - 27	11,7	5,0	6,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,7	2,9	5,5	0,7	56,8	1,3
	40 - 51	13,7	5,0	6,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,5	-1,2	7,5	0,8	52,1	1,1
	60 - 74	3,2	5,1	6,6							5,9	0,7	53,9	1,1
	83 - 96	10,0	5,2	6,5							5,0	0,6	59,6	1,3
	>110	3,3	5,5	6,7							3,9	0,7	55,7	1,1
OUE 4	0 - 4	47,2	4,6	4,7	0,9	1,1	0,2	0,1	2,3	11,2	7,3	0,4	56,3	1,2
	8 - 9	32,1	4,7	5,4	0,1	0,5	0,1	0,1	0,8	6,2	5,4	0,4	60,0	1,2
	26 - 39	10,4	5,0	6,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	4,2	0,6	57,9	1,0
	49 - 67	7,1	5,1	6,5							4,1	0,7	52,3	1,0
	74 - 80	5,3	4,8	6,2							0,9	0,9	64,9	0,4

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

la toposéquence, l'extraction de nickel par KCl et DTPA montre des variations importantes entre les différents faciès (Fig. 1). Les teneurs en Ni KCl et Ni DTPA sont très faibles sur piedmont, de 0 à 4  $\mu\text{g g}^{-1}$  de sol, alors qu'elles peuvent atteindre 60 et 120  $\mu\text{g g}^{-1}$  de sol dans les horizons de surface de la terrasse alluviale.

### Étude de la composition des solutions du sol sur les différents faciès de la toposéquence.

Des solutions du sol ont été prélevées, à 20 cm de profondeur, à proximité des profils OUE 1, OUE 3 et OUE 4, avec des bougies poreuses. Ni, Ca et Mg ont été dosés.

Alors que les concentrations en Ca et Mg varient relativement peu, on observe des variations importantes pour Ni (Fig. 2). Sa concentration qui est nulle sur piedmont atteint 5  $\mu\text{M}$  en bas de toposéquence.

Les indices de toxicité calculé à partir de ces valeurs sont de 0,06, 0,68 et 1,68 à proximité respectivement de OUE 1, OUE 3 et OUE 4. Sur piedmont (OUE 1), la valeur de cette indice ainsi que l'extractibilité du Ni par KCl et DTPA sont très faibles. Par contre, sur les matériaux colluvio-alluviaux, les deux extractants ne permettent pas de mettre en évidence de différence entre OUE 3 et OUE 4 alors que l'indice de toxicité et la concentration en Ni sont environ 3 fois plus élevés dans OUE 4 que dans OUE 3. Dans ce cas, les deux extractants chimiques ne permettent pas de rendre compte des variations de la composition chimique des solutions du sol.

### Etude de la composition des solutions du sol sous culture.

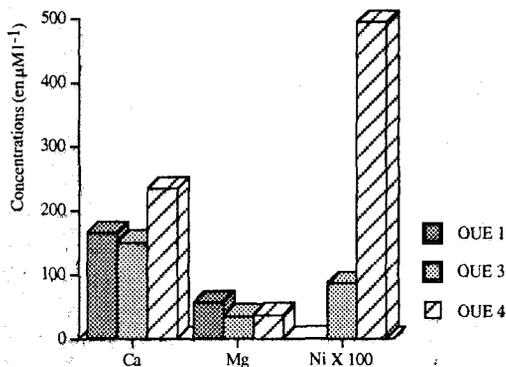


Fig. 2 Comparaison des concentrations en Ca, Mg et Ni (x 100) dans les solutions du sol récoltées le long de la toposéquence de sol.

Dans une parcelle d'essais située à proximité de la toposéquence étudiée, sur des matériaux colluvio-alluviaux, nous avons installé des plaques lysimétriques pour récolter des eaux gravitaires sous différentes parcelles.

Dans cet essai, cultivé avec du maïs,

- deux faciès colluvio-alluviaux ont été distingués (notés I et II),
- 3 traitements sont comparés :
  - apport de 4 tonne  $\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (P4),
  - apports de 4 tonne  $\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  + 20 tonnes de silicate de magnésium (P4 + Si),
  - apports de 4 tonne  $\text{ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  + 20 tonnes de compost (P4 + M.O.).
- 100  $\text{kgha}^{-1}$  d'urée sont apportés tous les 15 jours.

Les résultats préliminaires issus de l'analyse des solutions du sol sont présentés ci-dessous.

### EFFET DES AMENDEMENTS ORGANIQUES ET MINÉRAUX SUR $\text{Ito}_{\text{Ni}}$ (FIG. 3A).

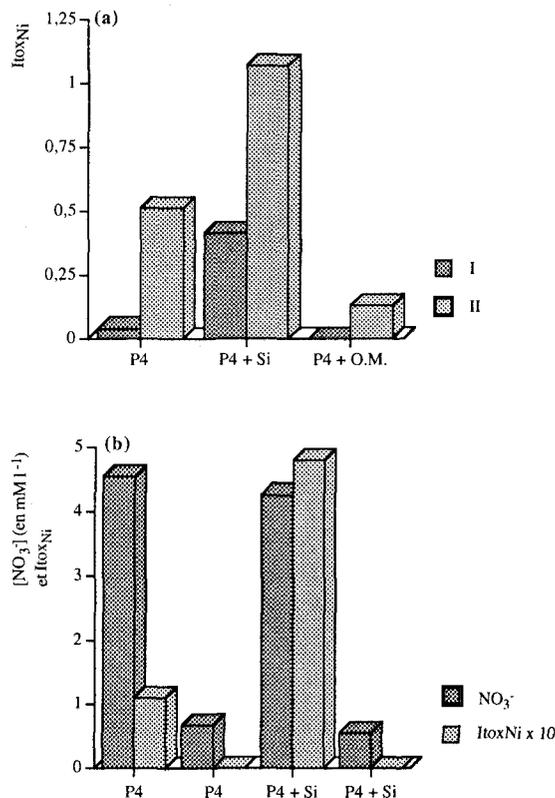
Outre les différences entre les deux faciès,  $\text{Ito}_{\text{Ni}}$  étant toujours plus important sous le faciès II, on observe que l'apport d'amendements silicatés provoque une augmentation importante de  $\text{Ito}_{\text{Ni}}$  (qui peut atteindre ponctuellement 1,6) par rapport au traitement phosphore seul, alors que l'amendement organique le diminue. Il n'y a pas de différence notable des concentrations en Ca et Mg dans les 3 traitements ; la minéralisation de la matière organique ne semble donc pas avoir un effet bénéfique en tant que source de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

### EFFET DE L'APPORT D'ENGRAIS AZOTÉS SUR $\text{Ito}_{\text{Ni}}$ (FIG. 3B).

Les conséquences d'un apport d'urée ont été analysées sur 2 parcelles du faciès I : P4 et P4 + Si pour 2 dates de prélèvements :

- Date 1 = 15 jours après un apport d'urée
- Date 2 = 3 mois après le dernier apport d'azote, sous inter-culture de sorgho.

On observe des concentrations élevées en nitrate dans les solutions après l'apport d'engrais. Dans ce cas,  $\text{Ito}_{\text{Ni}}$  est assez élevé (respectivement 0,11 et 0,48 sous P4 et P4 + Si), malgré l'augmentation de la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$ , qui est le cation accompagnateur majeur du nitrate, et de  $\text{Mg}^{2+}$ . Au contraire, pendant l'inter-cultu-



**Fig. 3** Effets des apports d'amendements minéraux (phosphate et silicates) et organiques (a) et des fertilisants azotés (urée) (b) sur  $Ito_{xNi}$ .

re, les teneurs en nitrate sont faibles et  $Ito_{xNi}$  est nul du fait de l'absence de Ni en solution.

## Discussion

### VARIABILITÉ DE LA DISPONIBILITÉ DU NICKEL DANS LES SOLS FERRALLITIQUES FERRITIQUES

Il existe, dans les sols ferrallitiques ferritiques, une variabilité importante de la disponibilité du Ni selon le faciès de sol. La disponibilité du Ni est pratiquement nulle sur piedmont alors qu'elle augmente fortement dans les zones d'apport alluvio-colluviaux, en particulier lorsque l'engorgement s'accroît. Ces observations sont conformes à celles réalisées lors d'une enquête agropédologique sur des sols analogues (Edighoffer 1997) ou observées lors d'expérimentations en serre (L'Huillier 1996).

Les teneurs en Ni extrait par KCl ou DTPA diminuent fortement avec la profondeur. Ceci suggère que cet élément est fortement associé à la matière organique. Toutefois, les

différences de teneur en carbone ne permettent pas d'expliquer l'extractibilité beaucoup plus importante dans les matériaux d'apports alluvio-colluviaux. Deux phénomènes peuvent intervenir dans la disponibilité du Ni (Becquer *et al.* 1995) :

- 1) l'existence d'un engorgement temporaire, de plus en plus accentué vers le bas de la toposéquence, qui pourrait induire la libération de Ni après réduction des oxy-hydroxydes de fer ;
- 2) la présence de minéraux silicatés altérables susceptibles de libérer du nickel. En particulier, la présence de silicates mal cristallisés pourrait avoir un rôle important (Quantin *et al.* 1997).

### INCIDENCE DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DISPONIBILITÉ DU NICKEL

Sous culture, les apports d'engrais azotés et d'amendements minéraux (phosphate, silicate) semblent favoriser la solubilisation du Ni. La production de protons au cours de la nitrification ou lors de la dissolution des engrais phosphatés (superphosphate triple) pourraient intervenir. Dans les conditions de l'étude, le système est parfaitement tamponné puisque les solutions collectées sont toujours proche de pH 7. Le principal système tampon correspond à la dissolution du carbonate de calcium apporté avant la culture. Toutefois, l'altération des silicates nickelifères du sol contribue probablement à la neutralisation des protons, bien que ce système tampon soit peu actif en présence de  $CaCO_3$  (Bonneau *et al.* 1987), et se traduit par la libération de Ni.

### INTÉRÊT DES EXTRACTANTS CHIMIQUES ET DE $Ito_{xNi}$ POUR ÉVALUER LE POTENTIEL TOXIQUE DU MILIEU

L'utilisation d'extractants chimiques tel que le DTPA peut permettre d'évaluer la disponibilité du Ni dans des analyses de routine. Toutefois, on observe certaines divergences par rapport à la composition de la solution du sol prélevée *in situ*. Ce type d'analyse ne permet donc probablement pas de prendre en compte les variations des conditions édaphiques, telles que pH, oxydo-réduction..., pouvant avoir lieu pendant des périodes éventuellement courtes, mais intervenant sur la mobilité du Ni.

L'indice de toxicité proposé,  $Ito_{xNi}$ , semble être beaucoup plus sensible aux variations des conditions édaphiques que les extrac-

tants chimiques. L'étude des variations de cet indice au cours du cycle cultural devrait donc permettre d'évaluer les risques de toxicité. Toutefois, il est encore nécessaire de préciser si les seuils de toxicité qui peuvent être définis sur cultures hydroponiques, comme cela a été réalisé pour des plantules de maïs (L'Huillier 1994), peuvent être retenus au niveau de la parcelle agricole et pour divers stades de développement de la plante.

De nombreuses voies de recherche sont encore à explorer pour préciser les risques de phytotoxicité liés à la présence de Ni dans ces sols. En particulier, les effets des apports de fertilisants ou d'amendements minéraux sur  $I_{toxNi}$  ainsi que le rôle de la matière organique doivent être précisés. En ce qui concerne plus particulièrement la matière organique, son incidence sur la fixation du Ni sur la phase solide du sol doit être étudiée. Il en est de même de l'influence de la matière organique soluble sur la spéciation du Ni, son assimilabilité et sa toxicité pour les végétaux.

### Remerciements

Les auteurs remercient 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.

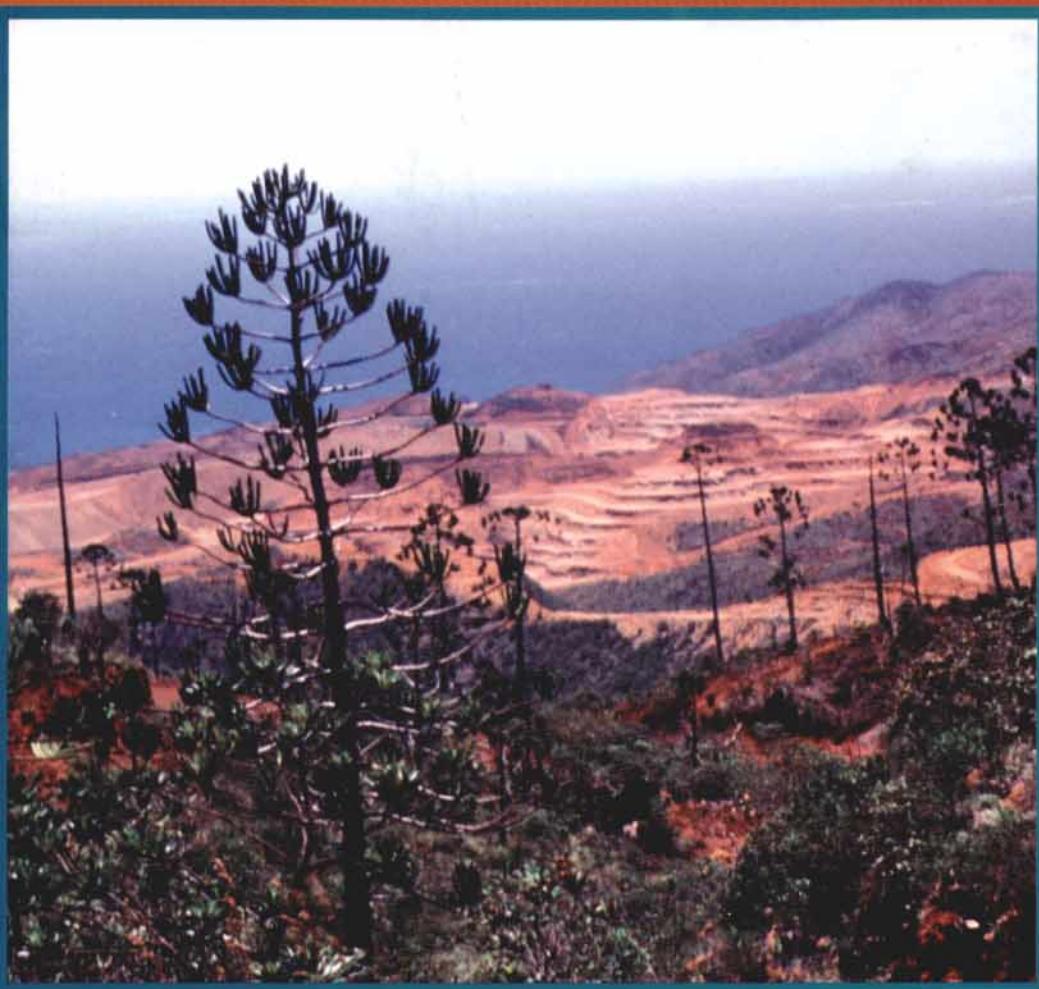
### Bibliographie

- Anderson, A.J., Meyer, D.R. & Mayer F.K. (1973) Heavy metal toxicities : levels of nickel, cobalt, and chromium in the soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an oat crop. *Australian Journal of Agricultural Research*, **24**, 557-571.
- Becquer, T., Boudot, J.P., Merlet, D. & Rouiller, J. (1992) Incidence des cycles de l'azote et du soufre sur le bilan de protons d'un écosystème forestier déperissant. Relation avec la toxicité aluminique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, **314**, 527-532.
- Becquer, T., Bourdon, E. & Pétard, J. (1995) Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris Série IIa*, **321**, 585-592.
- Bonneau, M., Dambrine, E., Nys, C. & Ranger, J. (1987) L'acidification des sols. *Bulletin d'Ecologie*, **18(3)**, 127-136.
- Bonzon, B., Edighoffer, S., L'Huillier, L., Bourdon, E. & Becquer, T. (1997) Facteurs de fertilité et conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Grande Terre : problématique de leur étude. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Bourdon, E., Becquer, T., Edighoffer, S. & Bonzon B. (1997) Evaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie - relation avec l'enracinement. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Brooks, R.R. (1987) *Serpentine and its vegetation : a multidisciplinary approach*, Dioscorides Press, Portland, OR, 454 pp.
- Edighoffer, S. (1997) Statut des nutriments et des métaux lourds des cultures maraichères et fruitières développées sur les sols oxydiques du sud de la Nouvelle-Calédonie. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Gasser, U.G., Juchler, S.J. & Sticher, H. (1994) Chemistry and speciation of soil water from serpentinitic soils : importance of colloids in the transport of Cr, Fe, Mg and Ni. *Soil Science*, **158(5)**, 314-322.
- Haselhoff, E. (1893) Versuche über die schädliche wirkung von nickel-haltigem wasser auf pflanzen. *Landwirtschaftliches Jahrbuch*, **22**, 1862-1868.
- Jaffré, T. (1980) Végétation des roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie, *Travaux et Documents* **124**, 275 pp. ORSTOM, Paris.
- Juste, C. (1988) Appréciation de la biodisponibilité des éléments traces dans du sol. *Science du Sol*, **26**, 103-112.
- Latham, M. (1986) 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, *Etudes et thèses*, ORSTOM, Paris.

- 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 de doctorat, *Travaux et Documents Microfichés*, 249 pp. ORSTOM, Paris.
- L'Huillier, L. (1997) Mécanismes d'action toxique du nickel chez le maïs. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Proctor, J. & Woodell, S.R.J. (1975) The ecology of serpentine soils. *Advances in Ecological Research*, **9**, 255-366.
- Proctor, J., Johnston, W.R., Cottam, D.A. & Wilson, A.B. (1981) Field-capacity water extracts from serpentine soils. *Nature*, **294**, 245-246.
- Proctor, J. & McGowan, I.D. (1976) Influence of magnesium on nickel toxicity. *Nature*, **260**, 134.
- Quantin, P., Bourdon, E. & Becquer, T. (1997) Minéralogie et contraintes édaphiques des sols dérivés de roches ultrabasiqes en Nouvelle-Calédonie. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Robertson, A.I. (1985) The poisoning of roots of *Zea mays* by nickel ions, and the protection afforded by magnesium and calcium. *New Phytologist*, **100**, 173-189.
- Trescases, J.J. (1975) L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Formation des gisements nickélicifères de Nouvelle-Calédonie, *Mémoires*, **78**, 259 pp. ORSTOM, Paris.
- Uren, N.C. (1992) Forms, reactions and availability of nickel in soils. *Advances in Agronomy*, **48**, 141-203.
- Whittaker, R.H., Walker, R.B. & Kruckeberg, A.R. (1954) The ecology of serpentine soils : a symposium *Ecology*, **35** (2), 258-288.

Écologie des milieux sur roches ultramafiques  
et sur sols métallifères

*The ecology of ultramafic and metalliferous areas*



Éditeurs scientifiques - *Scientific editors*

T. Jaffré  
R. D. Reeves  
T. Becquer

L'Institut  
français  
de recherche  
scientifique  
pour le  
développement  
en coopération

ORSTOM

CENTRE DE NOUMÉA