

# Relations entre les teneurs en nickel et manganèse foliaires de quelques espèces des maquis miniers et les risques de phyto-toxicité induits par ces éléments minéraux du sol

F. RIGALT, G. DAGOSTINI et T. JAFFRÉ

Laboratoire de Botanique et d'Écologie Végétale, Centre ORSTOM, BP A 5, 98848, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

## Résumé

L'étude porte sur l'analyse des variations de teneurs en nickel et manganèse dans les tissus foliaires de 10 espèces croissant naturellement sur 5 catégories de sols issus de roches ultramafiques.

La variation des teneurs en ces 2 éléments au sein d'une même espèce sur différents substrats traduit la différence de concentration de ces éléments sous forme assimilable dans le sol. Elle rend compte par là même des risques de toxicité plus ou moins importants pour les plantes.

Ces risques sont en ce qui concerne le nickel relativement faibles sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés, et élevés sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes. En dépit de teneurs en nickel total élevées, ils apparaissent moins importants sur ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion que sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes.

Les risques de toxicité en manganèse sont les plus importants sur ferrallisols colluvionnés de piedmonts et les plus faibles sur sols bruns hypermagnésiens et sur ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion. Ils sont intermédiaires sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes et sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés, mais varient beaucoup dans ces 2 cas d'une station à l'autre.

Les indices de concentrations (rapport de la concentration foliaire d'un élément donné et de sa concentration dans le sol) pour le nickel et le manganèse ont été calculés pour les différentes espèces étudiées croissant sur les différentes catégories de sol. Pour une espèce donnée, la valeur de l'indice de concentration pour un élément rend compte de sa biodisponibilité indépendamment des quantités totales de celui-ci. Les valeurs de cet indice sont en ce qui concerne le Ni les plus élevées pour les ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes et pour le Mn pour les ferrallisols colluvionnés de piedmonts.

Il apparaît que les variations de teneurs en nickel ou manganèse foliaire de certaines espèces des maquis miniers, et notamment de celles qui ont la capacité d'absorber et de tolérer des quantités relativement importantes de ces éléments dans leurs tissus, apportent des indications sur les risques de toxicité en ces éléments du sol.

## Introduction

Les conditions défavorables à la nutrition minérale des plantes sur sols issus de roches ultramafiques sont dues à des combinaisons de facteurs chimiques. Les plus souvent évoqués sont, comme il ressort de plusieurs synthèses bibliographiques (Whittaker *et al.* 1954; Proctor & Woodell 1975 ; Brooks 1987), les carences en phosphore, potassium et calcium et les teneurs excessives en magnésium, nickel, manganèse, cobalt et chrome.

Ces déséquilibres chimiques ont également été soulignés pour les sols issus de roches ultramafiques en Nouvelle-Calédonie (Birrel & Wright 1945 ; Jaffré & Latham 1974) et l'importance relative de ces facteurs chimiques limi-

tants a été étudiée par Jaffré (1976, 1980) à partir d'analyses de sols prélevés au niveau des systèmes racinaires ainsi que de tissus foliaires d'espèces croissant sur des sols en conditions naturelles.

Ces études ont montré qu'à côté d'une carence constante en P, K, Ca et d'une carence en azote dans le cas de la plupart des sols de maquis, il était possible d'identifier des facteurs chimiques limitants plus spécifiques à certains biotopes :

- le rapport Ca/Mg très inférieur à 1 dans les sols bruns eutrophes hypermagnésiens,
- la carence en P, K, Ca dans les sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) désaturés gravillonnaires ou cuirassés (Jaffré & Latham 1974),

- le déséquilibre Ca/Mg modéré associé à des excès de nickel dans les sols peu évolués d'érosion,
- des excès de manganèse dans les sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) colluviaux de piedmonts.

Les teneurs en éléments totaux ne rendent pas compte de sa disponibilité pour la plante. Celle-ci demeure largement fonction de la forme chimique de l'élément et des conditions hydriques et physico-chimiques du substrat.

La présente étude a pour but de préciser à partir d'analyses chimiques foliaires d'espèces se développant en conditions naturelles, la bio-disponibilité, et donc le risque de toxicité en Ni et Mn pour les plantes, dans différents types de biotopes sur sols issus des roches ultramafiques.

### Matériel et méthode

L'étude porte, dans le massif du Sud, sur 5 catégories de biotopes correspondant à 5 groupements végétaux définis sur une base phytosociologique et liés à 5 grandes catégories de substrats édaphiques (Jaffré 1980).

- Association à *Soulamea pancheri* et *Hibbertia vieillardii* (anciennement *H. lucida*) sur sols bruns eutrophes à légèrement ferrallitiques, hypermagnésiens sur serpentinites.
- Association à *Tarenna hexamera* (anciennement *T. leiloba*) et *Gardenia aubryi* sur sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) fortement désaturés, gravillonnaires ou cuirassés.
- Association à *Costularia pubescens* et *Styphelia albicans* sur sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) remaniés par érosion sur fortes pentes.
- Association à *Codia discolor* et *Eugenia stricta* sur sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) colluvionnés de piedmonts.
- Association à *Homalium kanaliense* et *Costularia comosa* sur sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisols) colluvio-alluviaux de plaines à hydromorphie temporaire.

Dans chaque catégorie de groupement végétal, 8 stations ont été choisies et un échantillon de sol a été constitué pour analyse à partir de 5 prélèvements élémentaires. Ceux-ci ont été effectués entre 2 et 15 cm de profondeur ce qui correspond à la fraction du profil pédologique où se trouve la plus grande partie du chevelu racinaire.

Les déterminations chimiques ont été réalisées au Laboratoire commun d'analyse du Centre ORSTOM de Nouméa, selon les méthodes décrites par Pétaud (1993 a, b). Elles ont porté sur le pH et sur les teneurs en Ni et Mn.

Dans chaque station des prélèvements foliaires pour analyse ont été réalisés sur 9 espèces [*Alphitonia neocaledonica* (Rhamnaceae), *Cloezia artensis* (Myrtaceae), *Eriaxis rigida* (Orchidaceae), *Grevillea gillivrayi* (Protéacées), *Montrouzieria sphaeroidea* (Guttifères), *Pancheria alaternoides* (Cunoniaceae), *Peripterygia marginata* (Celastraceae), *Scaevola beekii* (Goodeniaceae), *Stenocarpus umbelliferus* (Protéacées)], toutes à caractère ubiquiste, chaque fois qu'elles étaient représentées dans la station. Chaque échantillon foliaire a été constitué de feuilles adultes en bon état prélevées si possible sur 5 plants différents et lavées à l'eau permutée. La faible fréquence de certaines espèces sur certains substrats n'a pas permis dans tous les cas de constituer l'échantillon à analyser à partir de 5 plants différents.

### Résultats

#### LE PH DES SOLS

La figure 1 montre une grande variation de pH selon les catégories de sols. On adoptera le terme de ferrallisols pour désigner les sols ferrallitiques ferritiques (R.P.F. 1990). Les ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés ont les pH les plus acides, compris entre 4,2 et 4,9. Ils sont suivis par les ferrallisols colluvionnés de piedmonts dont les pH s'échelonnent de 4,6 à 5,8. Viennent ensuite les ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes dont l'amplitude est la plus importante (4,6 à 6), puis les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion (pH compris entre 5 et 6,3) et enfin les sols bruns hypermagnésiens qui ont les pH les plus élevés (de 6,3 à 7,1).

#### LES TENEURS EN NICKEL DANS LE SOL

Les teneurs en nickel du sol dans les 5 catégories de biotopes sont représentées sur la fig. 2.

Les concentrations moyennes les plus élevées en nickel (1,19 %) sont observées dans les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion et dans les ferrallisols colluvio-alluviaux hydro-

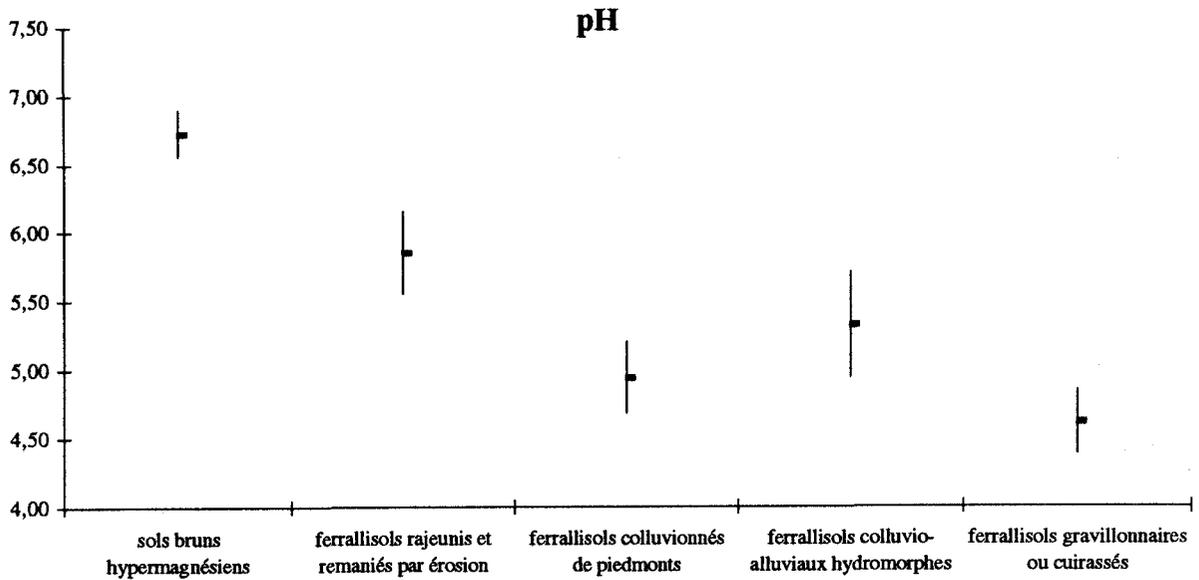


Fig. 1 Moyennes et écarts à la moyenne du pH des 5 catégories de substrats

morphes (0,92 %). Des teneurs moyennes, de l'ordre de 0,5 %, se rencontrent dans les ferrallisols colluvionnés de piedmonts et les sols bruns hypermagnésiens. Dans les ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés les teneurs moyennes sont les plus faibles (0,21 %).

Les variations les plus grandes s'observent dans les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion tandis que celles des ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés sont très peu importantes.

#### LES TENEURS EN NICKEL DANS LA PLANTE

Pour la plupart des espèces étudiées, la teneur moyenne en nickel foliaire est la plus élevée sur les ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes (Fig. 3). Les teneurs décroissent ensuite des ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion aux ferrallisols colluvionnés de piedmonts, aux sols bruns hypermagnésiens et aux ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés.

Les valeurs les plus élevées sont observées chez *Cloezia artemisia* et *Pancheria alaternoides* puis chez *Peripterygia marginata*.

La variation des quantités de nickel

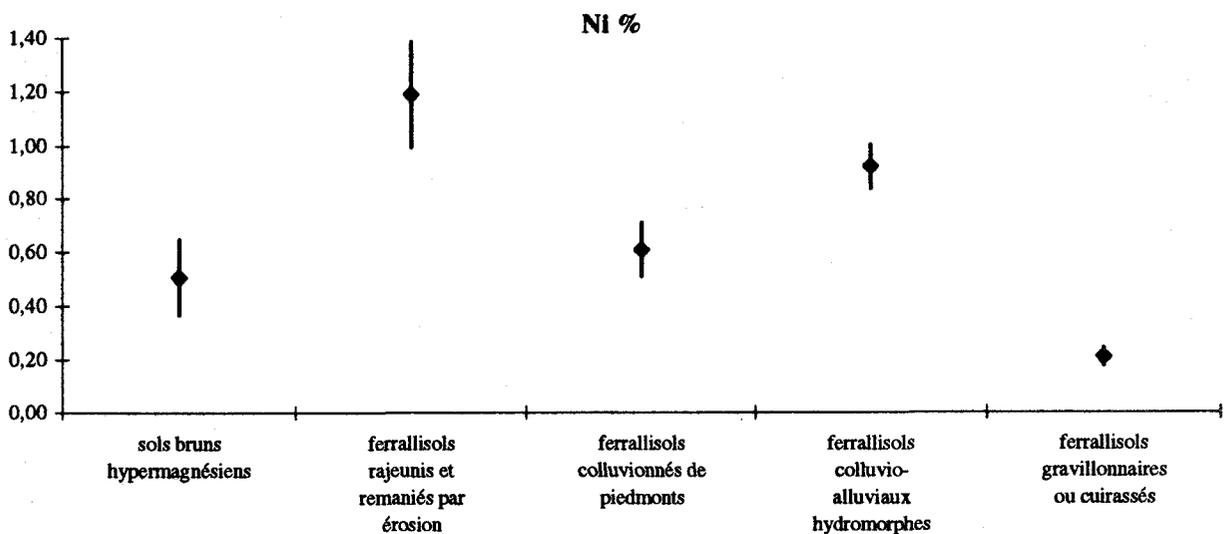
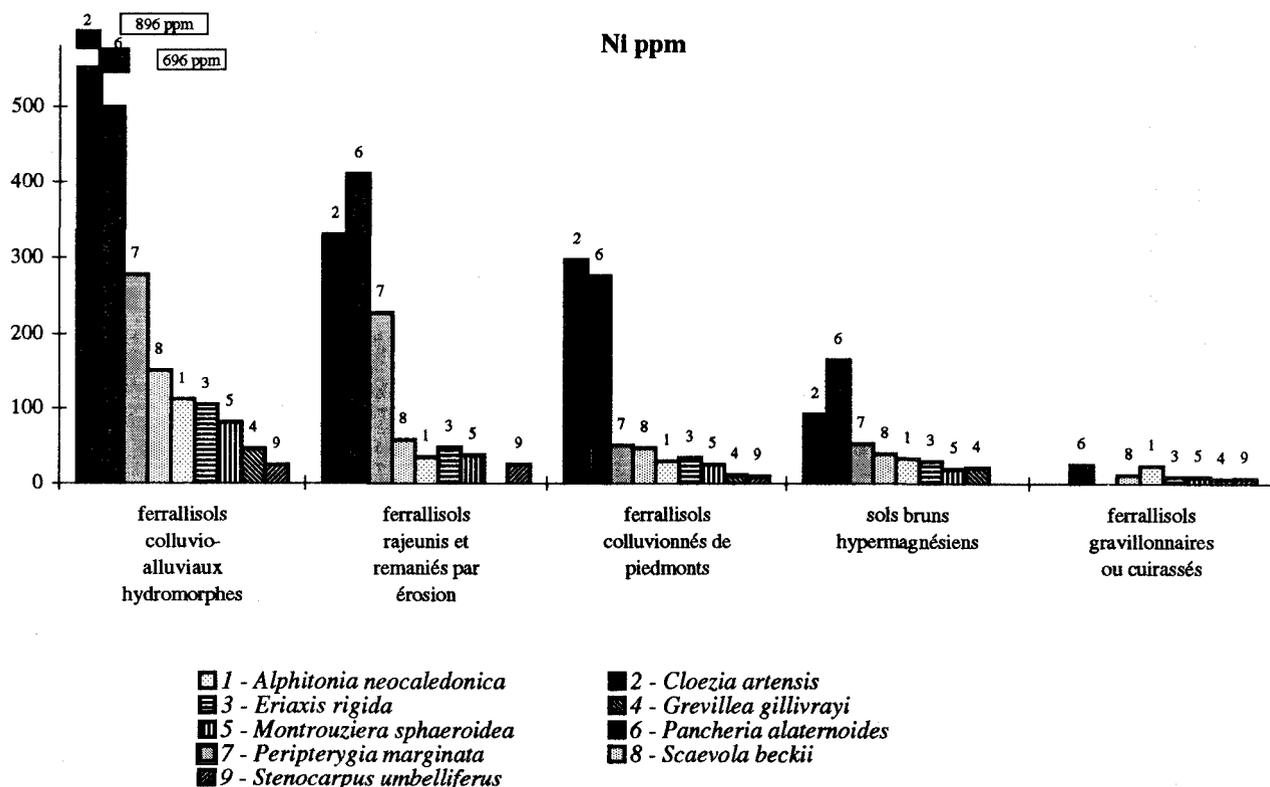


Fig. 2 Teneurs en nickel (valeurs moyennes et écarts à la moyenne) dans les 5 catégories de biotopes

absorbées par ces plantes sur les différents substrats est très importante. Ainsi la différence entre les teneurs moyennes en nickel foliaire observées entre les ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes et les sols bruns hypermagnésiens atteint-elle 740 ppm chez *Cloezia artensis* et 530 ppm chez *Pancheria alaternoides*. Pour cette dernière la différence est de 670 ppm entre les teneurs observées sur ferralli-

une espèce donnée sur un type de sol est déterminé par le rapport de la concentration foliaire de cet élément et de la concentration de celui-ci dans le sol. Il a été déterminé pour chaque espèce dans chaque station ce qui a permis d'établir une valeur moyenne pour chaque espèce par type de station.

Les indices moyens pour le Ni sont donnés sur la figure 4. Il ne concernent pas les 2



**Fig. 3** Teneurs moyennes en nickel (ppm) dans les tissus foliaires de 9 espèces prélevées dans 5 catégories de biotopes

sols colluvio-alluviaux hydromorphes et sur ferrallisols gravillonnaires et cuirassés.

Bien que les teneurs en nickel ne soient pas très élevées (de l'ordre de 81 à 151 ppm) les variations observées d'un type de substrat à l'autre demeurent très similaires chez *Scaevola beckii*, *Alphitonia neocaledonica*, *Eriaxis rigida* et *Montrouzieria sphaeroidea*.

Les valeurs les plus faibles, entraînant des variations peu importantes, se trouvent chez les deux Protéacées analysées : *Grevillea gillivrayi* et *Stenocarpus umbelliferus*.

L'INDICE DE CONCENTRATION : Ic Ni

L'indice de concentration (Ic) d'un élément pour

Protéacées dont les teneurs en Ni foliaire ne sont pas suffisamment élevées pour que les variations puissent être interprétées.

Les indices les plus élevés s'observent sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes et notamment chez *Cloezia artensis*, *Pancheria alaternoides* et *Peripterygia marginata*.

Pour ces deux premières espèces, l'Ic Ni décroît ensuite des ferrallisols colluvionnés de piedmonts aux ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion. Pour *Peripterygia marginata* cet indice est le plus élevé sur ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion puis sur sols bruns hypermagnésiens et enfin sur ferrallisols collu-

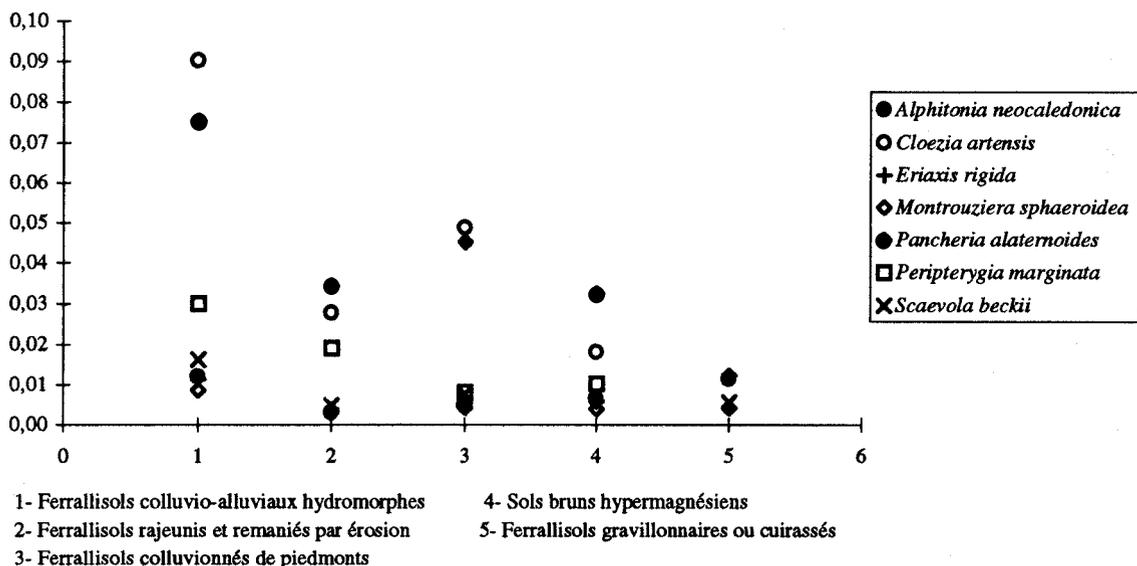


Fig. 4 Indice de concentration en nickel de quelques espèces par type de substrats

vionnés de piedmonts. Pour l'ensemble des espèces étudiées l'indice de concentration est le plus faible sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés à l'exception d'*Alphitonia neocaledonica* qui montre un indice identique sur ce type de biotope et sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes.

#### LES TENEURS EN MANGANÈSE DANS LE SOL

Les teneurs moyennes en manganèse pour

chaque type de biotopes sont représentées ainsi que les écarts à la moyenne sur la figure 5.

Les teneurs moyennes les plus élevées appartiennent aux ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes (0,83 %) suivis des ferrallisols colluvionnés de piedmonts (0,77 %). Viennent ensuite les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion (0,46 %) puis les sols bruns hypermagnésiens (0,4 %) et enfin les ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés (0,35 %).

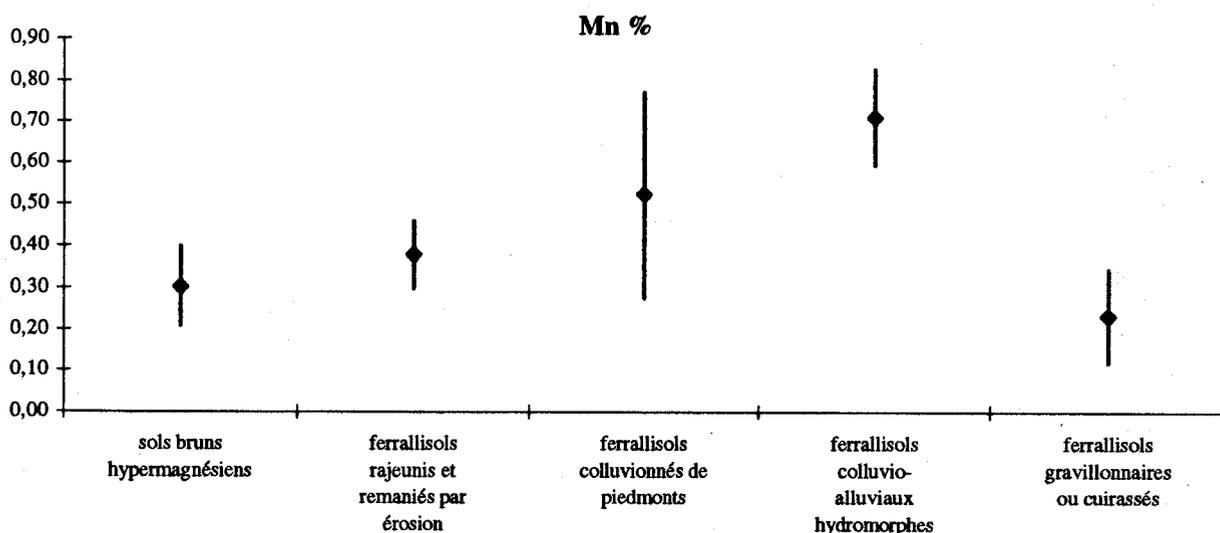
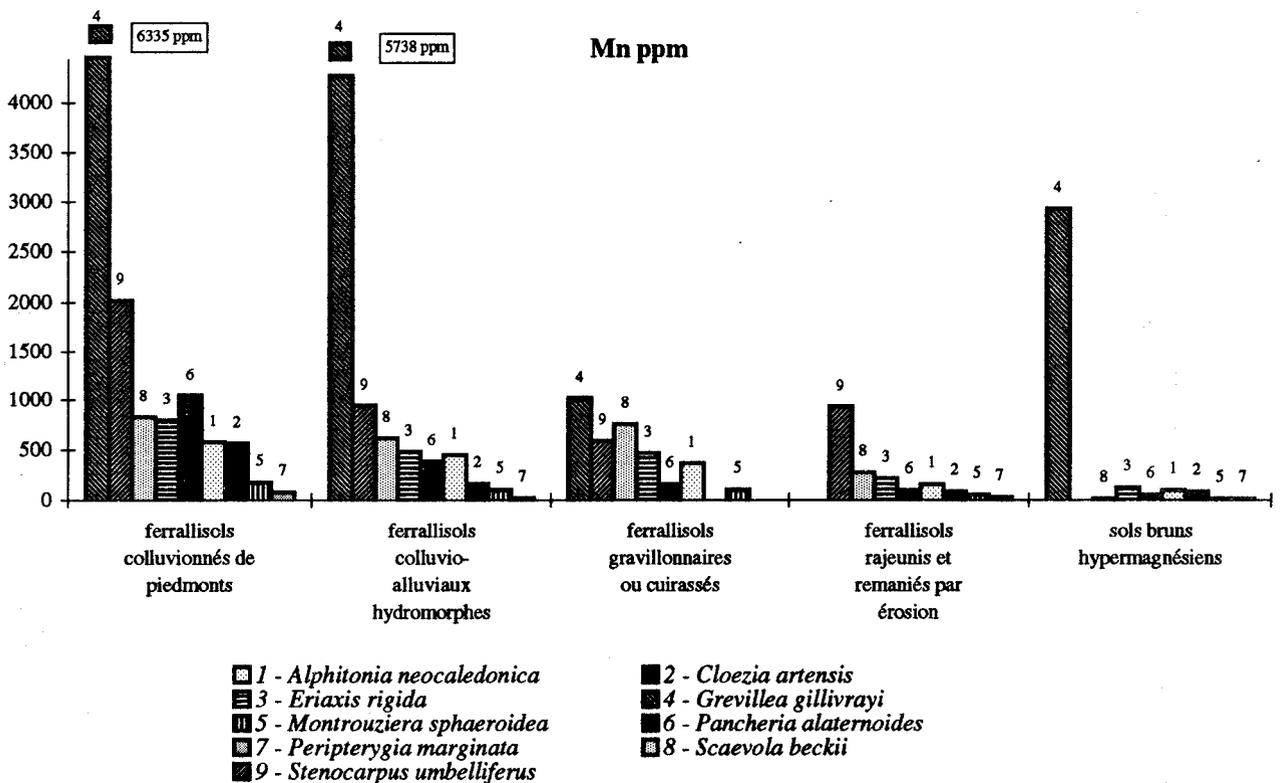


Fig. 5 Teneurs en manganèse (valeurs moyennes et écarts à la moyenne) dans les 5 catégories de biotopes

Au sein d'une même catégorie de sols les teneurs en manganèse varient plus que celles en nickel, sauf pour les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion. L'amplitude la plus grande se rencontre dans les ferrallisols colluvionnés de piedmonts avec des teneurs allant de 0,2 à 1,2 %. L'amplitude des variations de teneurs en manganèse de ce substrat englobe toutes les teneurs des autres substrats.

#### TENEURS EN MANGANESE DANS LA PLANTE

Les teneurs moyennes en manganèse dans les tissus foliaires sont représentées sur la figure 6.



**Fig. 6** Teneurs moyennes en manganèse (ppm) dans les tissus foliaires de 9 espèces prélevées dans 5 catégories de biotopes

Les valeurs absolues et les variations les plus importantes de teneurs en manganèse sont observées chez les deux Protéacées, *Grevillea gillivrayi* et *Stenocarpus umbelliferus*. Des valeurs faibles avec des variations de teneurs moyennes inférieures à 50 ppm se trouvent chez *Peripterygia marginata* et *Montrouziera sphaeroidea*.

Des teneurs dépassant 500 ppm avec des variations de 400 à 1000 ppm entre biotopes s'observent dans les cinq autres espèces analysées.

#### L'INDICE DE CONCENTRATION : Ic Mn

Les indices de concentration en manganèse pour les 7 espèces ayant des teneurs les plus élevées en cet élément, sont représentés par catégories de sol sur la figure 7.

Il apparaît, si l'on fait abstraction de *Grevillea gillivrayi* sur sols bruns hypermagnésiens qui appelle quelques commentaires, que les indices de concentration les plus élevés s'observent majoritairement sur ferrallisols colluvionnés de piedmonts, puis (l'ordre étant inversé pour 3 espèces) sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés. Les indices de concentration

s'échelonnent ensuite globalement par ordre décroissant des ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes aux ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion puis aux sols bruns hypermagnésiens.

Le cas de *Grevillea gillivrayi* dont l'indice de concentration, comme les teneurs en Mn foliaire, sont nettement plus élevés sur sols bruns hypermagnésiens que sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés pose le problème de l'homogénéité physiologique de cette espèce.

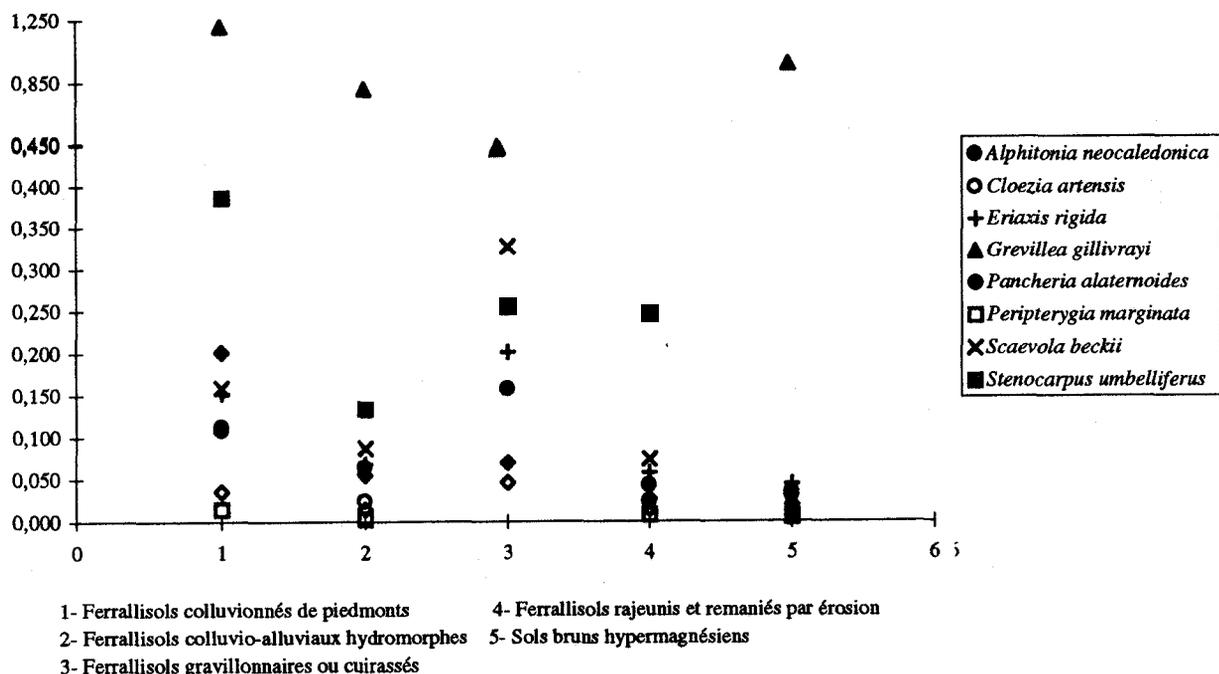


Fig. 7 Indice de concentration de manganèse de quelques espèces par type de substrats

Elle serait représentée, sur les sols les plus toxiques en manganèse, par des populations dotées d'une résistance supérieure à celles se trouvant sur des sols moins toxiques. Cette résistance s'exprimerait par un pouvoir d'absorption moindre de Mn assimilable à partir des sols qui en seraient les mieux pourvus. Ceci permettant à l'élément toxique de se maintenir en deçà du seuil de tolérance à l'intérieur des tissus végétaux des plantes croissant sur ces sols.

Des expérimentations consistant à effectuer des cultures croisées devraient permettre de vérifier cette hypothèse.

### Discussion

Les teneurs en nickel et manganèse total des différentes catégories de sols considérées ne rendent que très imparfaitement compte des risques de toxicité encourus par les plantes.

Ainsi, bien que les teneurs en nickel total du sol soient les plus élevées dans les ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion, ce ne sont pas sur ces sols que les espèces analysées ont leurs plus fortes teneurs en nickel foliaire. Celles-ci s'observent chez les plantes croissant sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes moins riches que les précédents en nic-

kel. La phytotoxicité de ces derniers a du reste été évoquée par l'Huillier (1994) et par Becquer *et al.* (1995).

De manière similaire les espèces croissant sur sols bruns hypermagnésiens ont des teneurs en nickel foliaire nettement inférieures à celles qui se développent sur ferrallisols colluvionnés de piedmonts qui ont pourtant des teneurs en nickel total de même ordre de grandeur. Les ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés, qui sont les moins riches en nickel total, portent quant à eux, les plantes dont les teneurs en nickel foliaires pour une espèce donnée sont les moins élevées.

Les quantités de nickel du sol disponibles pour la plante sont donc à la fois fonction des teneurs en nickel total du sol et de facteurs favorisant ou entravant sa biodisponibilité. Pour une même espèce sur un sol donné, l'indice de concentration rend compte de la biodisponibilité de l'élément, indépendamment des quantités totales de celui-ci dans le sol. Dans le cas des sols bruns hypermagnésiens et à un degré moindre dans celui des ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion, cet indice est influencé par un pH et des teneurs en magnésium élevées, deux facteurs liés, qui comme il est couramment

admis (Ross 1994) limitent l'assimilabilité du nickel par les plantes. Les indices élevés de concentration en nickel observés sur ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes pourraient être mis en relation avec l'hydromorphie temporaire du sol où les oxyhydroxydes de fer sont souvent à l'état réduit, ou à la présence de minéraux silicatés nickelifères (Becquer *et al.* 1995).

Les faibles teneurs en nickel foliaire des espèces croissant sur ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés ne peuvent pas être mises seulement sur le compte des teneurs peu élevées du nickel dans ces sols. La faible disponibilité du nickel, en dépit de pH acide, se traduit par des indices de concentrations relativement bas pour les différentes espèces analysées sur ce type de sol. Des facteurs d'immobilisation du nickel sont à rechercher dans ce cas pour expliquer le phénomène.

En ce qui concerne le manganèse, les teneurs les plus élevées dans les tissus foliaires sont enregistrées dans les ferrallisols colluvionnés de piedmonts puis dans les ferrallisols colluvio-alluviaux hydromorphes qui ont aussi, mais dans l'ordre inverse, les teneurs moyennes en manganèse les plus élevées.

Les indices de concentration de cet élément pour les différentes espèces sont les plus forts sur les ferrallisols colluvionnés de piedmonts et sur les ferrallisols gravillonnaires ou cuirassés qui se caractérisent par des pH de l'ordre de 4,5 à 5. Les indices de concentration pour le manganèse sont les plus faibles sur les sols bruns hypermagnésiens, exception faite pour *Grevillea gillivrayi* dont l'homogénéité physiologique est ici mise en doute, et à un degré moindre sur ferrallisols rajeunis et remaniés par érosion. La variation de l'indice de concentration de cet élément pour une même espèce dans différentes conditions de milieu apparaît largement influencée par le pH du sol, ce qui n'exclut pas l'effet d'autres facteurs qui restent à préciser.

### Conclusion

Les variations des teneurs en nickel et manganèse foliaire d'espèces croissant dans différents biotopes rendent assez bien compte des différences de quantités de ces éléments sous forme assimilable dans les sols correspondants. Celles-ci sont fonction à la fois des quantités totales de

l'élément et des facteurs du milieu favorisant ou atténuant sa biodisponibilité.

L'indice de concentration de l'élément d'une espèce dépend d'une part des caractéristiques propres à l'espèce qui absorbe plus ou moins cet élément ou qui en freine l'absorption dans ses tissus et d'autre part des facteurs de biodisponibilité de l'élément dans le sol.

Les variations de teneurs observées sont entachées d'une marge d'erreur due à l'hétérogénéité des sols explorés par les systèmes racinaires des espèces analysées. En outre les variations de concentrations en nickel et en manganèse dans les tissus foliaires sont fonction de leurs âges qui ne peuvent être parfaitement contrôlés en conditions naturelles.

Il ressort que les différences de variations sont d'autant plus faciles à interpréter et d'autant plus significatives que l'élément considéré est absorbé en quantité plus abondante. Ainsi l'utilisation de *Pancheria alaternoides*, de *Cloezia artensis* et de *Peripterygia marginata* apparaît assez favorable pour tester les risques de toxicité en nickel du sol. Plusieurs Protéacées (à condition de s'assurer de l'homogénéité physiologique des espèces végétales utilisées), ainsi que *Scaevola beckii*, *Alphitonia neocaledonica* et *Montrouzieria sphaeroidea* sont également utilisables pour évaluer l'importance des risques de toxicité en manganèse.

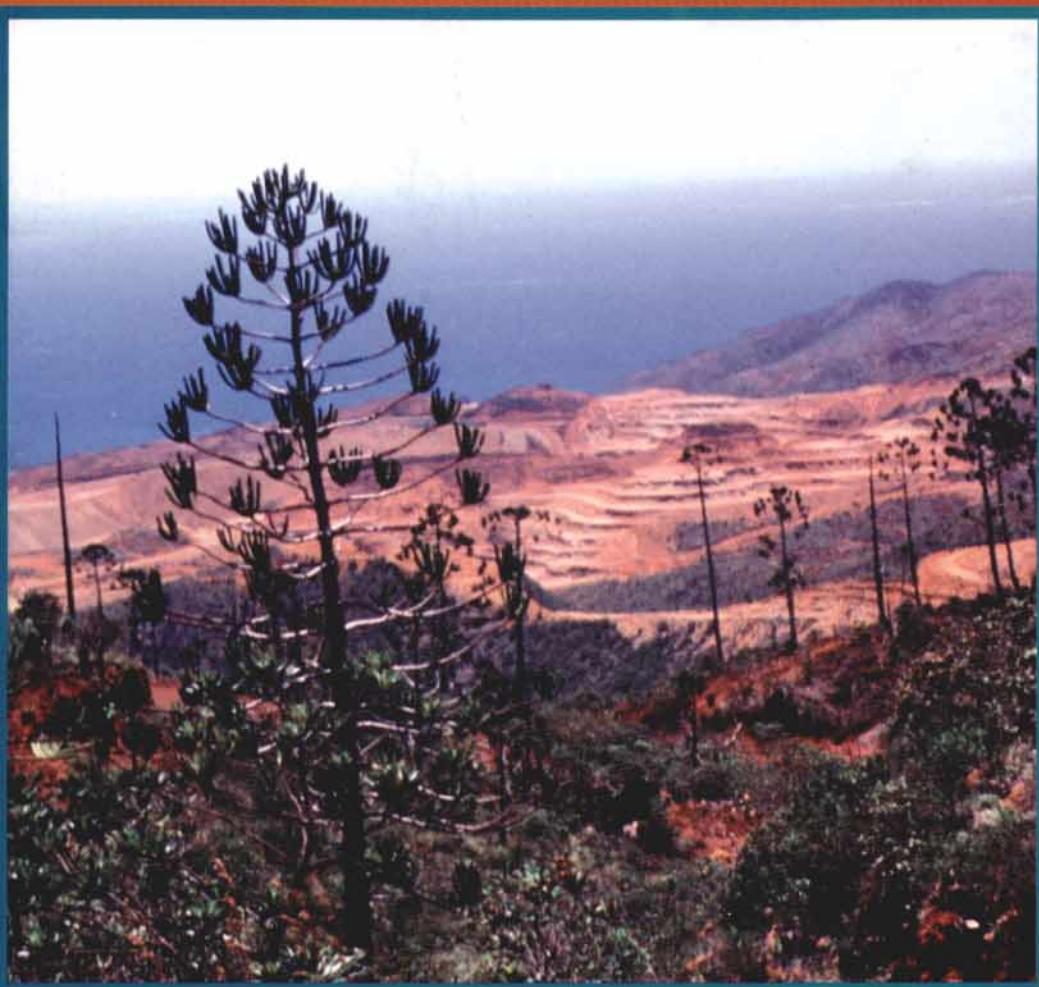
### Bibliographie

- 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.
- Birrel, K.S. & Wright, A.C.S. (1945) A serpentine soil in New Caledonia. *New Zealand Journal of Science and Technology*, 27, 72-76.
- Brooks, R.R. (1987) *Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach*, 454 pp. Dioscorides Press, Portland, OR.
- Jaffré, T. & Latham M. (1974) Contribution à l'étude des relations sol-végétation sur un massif de roches ultrabasiqes de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie: le Boulinda. *Adansonia*, 14, 3, 311-336.

- Jaffré, T. (1976) Composition chimique et conditions de l'alimentation minérale des plantes sur roches ultrabasiques (Nouvelle-Calédonie). *Cahiers ORSTOM, Série Biologie*, **11**, 53-63.
- Jaffré, T. (1980) Végétation des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. *Travaux et Documents* **124**, 273 pp. 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 Microfilmés*, **153**, 249 pp. ORSTOM, Paris.
- Pétard, J. (1993a) Les méthodes d'analyse. Tome 1, Analyses des sols. *Notes techniques*, **5**, 196 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Pétard, J. (1993b) Les méthodes d'analyse. Tome 3, Analyses des sols. *Notes techniques*, **7**, 50 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Proctor, J. & Woodell, S.R.J. (1975) The ecology of serpentine soil. *Advances in Ecological Research*, **9**, 255-366.
- R.P. F. (1990) Référence Pédologique Française, 3ème proposition, avril 1990, 279 pp. INRA.
- Ross, S. M. (1994) Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. *Toxic Metals in Soil-Plant Systems* (ed. S.M. Ross), pp. 63-152. John Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- Whittaker R.H., Walker R.B. & Kruckeberg A.R. (1954) The ecology of serpentine soils : a symposium. *Ecology*, **35**, 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