

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 11

1991

Mise en valeur des sols ferrallitiques
des massifs du Sud de la Nouvelle Calédonie

Etude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées :
synthèse des connaissances actuelles

Laurent L'HUILLIER
Sylvie EDIGHOFFER

Avenant n°1 à la Convention
ORSTOM / Province Sud
du 14 janvier 1991

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 11

1991

Mise en valeur des sols ferrallitiques
des massifs du Sud de la Nouvelle Calédonie

Etude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées :
synthèse des connaissances actuelles

Laurent L'HUILLIER
Sylvie EDIGHOFFER



28 AVR. 1992

Avenant n°1 à la Convention ORSTOM / Province Sud
du 14 janvier 1991

ORSTOM

L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

ORSTOM Biologie
LHU
CENTRE DE NOUMÉA

H2 64435
2ex For

F 35.008

© ORSTOM, Nouméa, 1991

/L'Huillier, L.
/Edighoffer, S.

Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle Calédonie. Etude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées : synthèse des connaissances actuelles
Nouméa : ORSTOM. Décembre 1991, 16 p.
Conv. : Sci. Vie : Agropédol. ; 11

Ø76PHYBIOØ1; Ø76AGROØ1

AGRONOMIE; PEDOLOGIE; RELATION SOL PLANTE; TOXICITE; NICKEL; PLANTE CULTIVEE;
SYNTHESE; OXISOL/NOUVELLE CALEDONIE; PROVINCE SUD

Imprimé par le Centre ORSTOM
de Nouméa
Décembre 1991

 ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS

L'objectif de cette première synthèse bibliographique est d'orienter les recherches à engager pour une étude de la toxicité, sur les plantes cultivées, du nickel des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Nouvelle-Calédonie. Les sols de cette région, notamment ceux issus des massifs ultrabasiques, ont en effet des teneurs élevées en cet élément, teneurs dont on ignore encore, pratiquement, les conséquences sur le développement des cultures dans ces conditions de milieux.

C'est donc tout naturellement que les recherches en questions ont été inscrites dans le cadre de la convention de recherche passée entre la Province Sud et l'ORSTOM pour l'Etude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre.

Conduites au sein du Laboratoire d'Agropédologie du Centre ORSTOM de Nouméa, l'intérêt théorique de ces recherches déborde largement de ce cadre et a conduit l'équipe qui en est chargée à solliciter l'appui de Monsieur le Professeur d'Auzac de la Chaire de Physiologie Végétale Appliquée de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, que les auteurs tiennent à remercier ici déjà pour la documentation qu'il leur a adressée.

SOMMAIRE

Résumé - Mots clés	3
1. Introduction	4
2. Teneurs normales en nickel dans les différentes parties de la plante	4
3. Niveaux toxiques du nickel dans la plante et dans la solution de culture	7
4. Effets toxiques du nickel sur la plante.....	8
5. Relations entre le sol et la teneur en nickel dans la plante.....	9
6. Interactions entre le nickel et certains éléments.....	10
7. Etats des connaissances sur les sols ferrallitiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie	11
8. Conclusion.....	12
Bibliographie.....	13

RESUME

Cette première synthèse bibliographique s'inscrit dans le cadre de la convention de recherche passée entre la Province Sud et l'ORSTOM pour la mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre. Son objectif est d'orienter les recherches à engager pour une étude de la toxicité, sur les plantes cultivées, du nickel présent à de fortes teneurs dans ces sols.

Les teneurs normales en nickel dans les plantes cultivées varient, en moyenne, de 0.05 à 5.0 ppm. Quant aux niveaux toxiques, on peut craindre qu'une teneur soit excessive quand elle excède les 50 ppm (Vanselow, 1966). Toutefois, il existe de fortes variations, en particulier en fonction de l'espèce.

Les principaux symptômes de toxicité sont des chloroses, suivies de nécroses des feuilles, accompagnées par des retards de croissance, voire des déformations de différentes parties du plant (Mishra & Kar, 1974).

La disponibilité du nickel dans un sol dépend du type de sol en question, et de ses caractéristiques physico-chimiques : un pH inférieur à 5.6 semblerait favoriser la solubilisation du nickel (Mizuno, 1967; Masuda & Sato, 1962); une forte teneur en matière organique semble, au contraire, diminuer sa disponibilité (Halstead *et al.*, 1969).

Il existe de très nombreuses interactions entre le nickel et d'autres éléments, qui peuvent modifier son absorption.

Mots clés : nickel, toxicité, symptômes, interactions, sols ferrallitiques, oxisols.

1. INTRODUCTION

Il y a plus de 60 ans, Martini (1930) considérait que le nickel était un constituant normal des tissus végétaux étant donné sa grande distribution au sein du règne végétal. Toutefois, durant la quarantaine d'années qui suivit, aucune recherche n'a conclu à un rôle ou une importance particulière du nickel dans les plantes. Seuls des effets toxiques ont été notés, comme par Brenchley (1947) qui attribue au nickel les échecs totaux de cultures en Ecosse sur certains sols contenant des quantités importantes de cet élément. Ainsi, la plupart des documents de l'époque s'intéressaient-ils aux effets toxiques du nickel sur les plantes, et à ses propriétés fongicides.

Ce n'est qu'à partir de 1975 qu'ont été nettement mis en évidence certains rôles fondamentaux du nickel dans le métabolisme de la plante, en particulier dans le fonctionnement de certains systèmes enzymatiques. Ainsi, Dixon (1975) a constaté que l'uréase du haricot (*Phaseolus vulgaris*) est une enzyme nickel-dépendante. Le nickel serait donc ce que l'on appelle un élément essentiel, du moins pour de nombreuses plantes.

Les réponses sont moins nombreuses et surtout moins claires quand il s'agit de statuer sur la toxicité du nickel, qui semble avoir été mise en évidence pour la première fois par Haselhoff (1893). Ceci témoigne probablement de la complexité du phénomène dont l'intensité varie énormément en fonction de nombreux paramètres, tel que l'espèce, l'organe observé, la nature du sol et ses caractéristiques - comme le pH - qui influent sur la disponibilité du nickel et dans le même temps sur le développement de la plante, probablement le climat, ...

La documentation réunie à ce jour a permis ainsi de faire un premier point sur :

- les teneurs normales en nickel dans les végétaux ;
- les teneurs correspondant à une toxicité ;
- les effets sur la croissance et de développement ainsi que sur les symptômes de toxicité ;
- l'assimilation du nickel en fonction du type et des caractéristiques du sol;
- les synergies et les antagonismes qui existent entre le nickel et certains éléments ;
- les résultats des premières recherches conduites sur les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Grande Terre.

2. TENEURS NORMALES EN NICKEL DANS LES DIFFÉRENTES PARTIES DE LA PLANTE

Vanselow (1966) a analysé les teneurs en nickel de nombreuses plantes cultivées et de plusieurs espèces indigènes (non cultivées). Il a ainsi montré que la plupart des plantes se développant sur des sols n'ayant pas de teneurs excessives en nickel (c'est à dire ayant quelques centaines de ppm) ont des teneurs en cet élément qui varient de 0.05 à 5.0 mg/kg de matière sèche (ppm). Les tissus de quelques espèces peuvent avoir des teneurs plus fortes : c'est le cas de l'avoine (*Avena sativa*) et du blé (*Triticum sativum*) qui peuvent contenir de 4 à 134 ppm de nickel.

Hutchinson *et al.* (1974) ont analysé les teneurs en nickel des feuilles de laitue (*Lactuca sativa*), de céleri (*Apium graveolens*), de chou-fleur (*Brassica oleracea var. Botrytis*), d'oignon (*Allium cepa*), de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) et de carotte (*Daucus carota*) à la récolte : elles varient de 2.8 à 6.2 ppm. Keeney et Walsh (1975) ont obtenu des valeurs de 0.9 à 2.5 ppm de nickel pour le seigle (*Secale cereale*), le sorgho (*Andropogon sorghum*) et le maïs (*Zea mays*).

Le Tableau I en page suivante présente les valeurs moyennes des teneurs normales en nickel dans différentes parties de plusieurs espèces. Ce tableau montre qu'il est difficile d'établir des normes précises sur les teneurs normales en nickel dans les végétaux pour les principales raisons suivantes.

Tout d'abord on peut constater qu'il y a de fortes variations de la teneur en nickel entre les différentes espèces, même si elles sont cultivées sur le même sol (Masuda & Sato, 1961). Ensuite, la même espèce cultivée sur différents sols présentera des teneurs en nickel très différentes dans ses tissus d'un sol à l'autre. Cette variation, est essentiellement due aux teneurs variables en cet élément dans les sols (Chang & Sherman, 1953; Vergnano, 1953; Hunter, 1954; Soane & Saunders, 1959); elle peut aussi être due aux caractéristiques physico-chimiques du sol qui sont susceptibles d'agir sur l'assimilabilité du nickel et donc de modifier sa teneur dans la plante. De même, une forte température du sol influence la distribution du nickel dans les différentes parties de la plante, en augmentant son transport des racines vers les feuilles (Paribok & Kuznetsova, 1963).

La teneur en nickel peut également évoluer durant la croissance de la plante. Dans le cas de l'avoine par exemple (Crooke & Knight, 1955), durant une expérimentation de 70 jours allant de la germination à la maturité de la plante, la teneur totale en nickel a augmenté rapidement les 30 premiers jours, puis a diminué lentement. Dans les tout premiers stades de la croissance, la teneur en nickel a augmenté relativement lentement dans les tissus, en rapport probablement avec la mise en place du système racinaire.

Par ailleurs, le nickel est réparti différemment dans les différents organes de la plante. Chez l'avoine, toutes les parties de la plante ont des teneurs élevées en nickel, mais les feuilles en contiennent d'habitude plus que les tiges, les limbes plus que les gaines des feuilles, les fleurs plus que les pédoncules et les grains plus que la paille (Hunter & Vergnano, 1952). Chez la primevère (*Primula obconica*), le trèfle (*Trifolium repens*) et l'élodée du Canada (*Elodea canadensis*) le nickel est localisé surtout dans les feuilles et les fleurs (Sainko *et al.*, 1968). Il est aussi souvent concentré de façon importante dans les racines, comme dans celles de l'élodée.

L'âge d'un organe influe aussi sur sa teneur en nickel. Ainsi chez l'avoine, les organes les plus jeunes en contiennent généralement plus que ceux qui sont âgés (Hunter & Vergnano, 1952). Les jeunes feuilles de blé ont aussi des teneurs en nickel plus élevées que celles des vieilles feuilles (Prince, 1957). Par contre, chez le tournesol (*Helianthus annuus*) cultivé sur un milieu riche en nickel, les vieilles feuilles en contiennent plus que les jeunes (Agarwala & Kumar, 1962). De même, une récolte tardive de luzerne (*Medicago sativa*) et de trèfle entraîne une augmentation de la teneur en nickel (Tokovoi & Maiboroda, 1962).

Une remarquable variation saisonnière de la teneur en nickel a été notée sur plusieurs arbres comme le platane (*Platanus*), le marronnier (*Aesculus*) et le hêtre (*Fagus*) (Guha & Mitchell, 1966). Dans les feuilles de ces plantes, la teneur en nickel augmente d'abord légèrement au début du printemps, puis régulièrement avant la sénescence, durant laquelle la teneur en nickel diminue.

Golovchenko et Cherednichenko (1962) ont tenté de localiser le nickel dans les cellules de feuilles et de racines de pommier (*Pyrus malus*), de poirier (*Pyrus communis*), de pomme de terre et de cotonnier (*Gossypium*). Il apparaît que la plus grande partie du nickel serait localisée dans des plastes et qu'une faible quantité se trouve dans le cytosol.

TABLEAU I. TENEURS MOYENNES NORMALES EN NICKEL DANS LES ORGANES OU LE VEGETAL ENTIER DE PLUSIEURS ESPECES

Espèce (nom commun)	Partie analysée	Teneur en nickel (mg/kg de matière sèche) (ppm)	Référence
<i>Allium cepa</i> (oignon)	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Andropogon sorghum</i> (sorgho)	plante	0.9-2.5	Keeney et Walsh (1975)
<i>Aptium graveolens</i> (céleri)	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Artemisia scoparia</i> (Armoise)	racine	10	Maksudov <i>et al.</i> (1962)
	plante	10-30	Maksudov <i>et al.</i> (1962)
	plante	0.3-1.0	Mursaliyev (1969)
<i>Avena sativa</i> (avoine)	plante	17-134	Vergnano (1953)
	plante	16	Williams (1967)
	plante	91	Williams (1967)
	feuille	7.2-32	Hunter (1954)
	feuille	3 ou <3	Hunter (1954)
	grain	1.9	Karvanek & Janicek (1968)
	grain paille	(moyenne de 35 variétés) 60 28	Halstead <i>et al.</i> (1969) Halstead <i>et al.</i> (1969)
<i>Brassica oleracea var. Botrytis</i> (chou-fleur)	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Capsicum annuum</i> (piment doux)	racine	0.0-45.7	Estañ, Bolarín & Guillen (1988)
	tige	0.0-2.5	
	feuille	0.0-4.0	
	fruit	0.0-1.3	
<i>Cedrus</i> (cèdre)	noix	0.046-0.073	Karetnikov <i>et al.</i> (1966)
	noix	0.09-0.42	Rush & Lisunova (1969)
<i>Daucus carota</i> (carotte)	racine charnue	0.4-0.6	Babov <i>et al.</i> (1970)
	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Lactuca sativa</i> (laitue)	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	fruit	0.013	Pyatnitskaya (1970)
<i>Medicago sativa</i> (luzerne)	plante	44	Halstead <i>et al.</i> (1969)
<i>Oryza sativa</i> (riz)	grain	2.5-5.0	Sarkunan <i>et al.</i> (1989)
	paille	1.0-5.0	
<i>Panicum miliaceum</i> (millet commun)	grain	4.33	Los <i>et al.</i> (1966)
<i>Pisum sativum</i> (pois)	graine	2.57	Los <i>et al.</i> (1966)
<i>Pyrus malus</i> (pommier)	fruit	20	Kulik & Barabash (1961)
	fruit	0.4	Petrova & Radenkov (1969)
	fleur	2.5	Petrova & Radenkov (1969)
<i>Raphanus sativus</i> (radis)	racine charnue	0.11-0.2	Babov <i>et al.</i> (1970)
<i>Rumex</i> (oseille)	fruit	0.369	Pyatnitskaya (1970)
<i>Secale cereale</i> (seigle)	plante	0.9-2.5	Keeney et Walsh (1975)
<i>Solanum melongena</i> (aubergine)	racine	<53.3	Salim <i>et al.</i> (1988)
	tige	<31.1	
	feuille	<25.4	
	fruit	<15.4	
<i>Solanum tuberosum</i> (pomme de terre)	feuille	2.8-6.2	Hutchinson <i>et al.</i> (1974)
<i>Spinacia oleracea</i> (épinard)	feuille	4.2 (moyenne de 44 variétés)	Karvanek & Bohmova (1966)
<i>Trifolium repens</i> (trèfle)	graine	5.7	Suctu & Ivanof (1963)
<i>Triticum sativum</i> (blé)	grain	1.06-2.69	Asmaeva & Il'vitskii (1969)
<i>Zea mays</i> (maïs)	grain	0.5	Suctu & Ivanof (1963)
	grain	1.4	Los <i>et al.</i> (1966)
	plante	0.9-2.5	Keeney et Walsh (1975)

3. NIVEAUX TOXIQUES DU NICKEL DANS LA PLANTE ET DANS LA SOLUTION DE CULTURE

Vanselow (1966) a suggéré que des teneurs en nickel dans les tissus supérieures à 50 ppm pouvaient être considérées comme excessives. Ainsi, des symptômes de toxicité apparaissent sur de jeunes *Citrus* contenant 55 ppm de Ni dans leurs feuilles.

Mais les teneurs toxiques en nickel dans la plante sont très variables, en particulier selon l'espèce considérée.

Par ailleurs, beaucoup de plantes manifestent des symptômes de toxicité lorsque la solution du milieu de culture contient quelques mg/l de nickel.

Le Tableau II ci-dessous donne des valeurs de concentrations toxiques en nickel dans les solutions de culture (culture hydroponique ou sur support inerte), ainsi que des teneurs toxiques en nickel dans les végétaux.

TABLEAU II. TENEURS TOXIQUES EN NICKEL DANS LA SOLUTION DE CULTURE ET DANS LA PLANTE

Plante (nom commun)	Concentration toxique en nickel dans la solution de culture (mg/l)	Teneur toxique en nickel dans différentes parties du végétal (mg/kg de matière sèche) (ppm)	Effets	Référence
<i>Avena sativa</i> (avoine)	- 10, 20, 30 - - - 2.5 1.5	153 (feuilles) 144, 590, 925 (feuilles) > 28 (paille) > 60 (grains) 43-88 (plante) - -	- retard de croissance retard de croissance retard de croissance chlorose inter-nervaire - -	Hunter & Vergnano (1952) Mishra & Kar (1974) Halstead <i>et al.</i> (1969) Halstead <i>et al.</i> (1969) Anderson <i>et al.</i> (1973) Croke (1954) Proctor & McGowan (1976)
<i>Brassica oleracea</i> var. <i>acephala</i> (chou vert)	>1	-	retard de croissance	Hara & Sonoda (1979)
<i>Capsicum annuum</i> (piment doux)	12	248 (tiges) 423 (feuilles) 159 (fruits)	diminution de poids des organes de 80 à 87 %	Estañ <i>et al.</i> (1988)
<i>Citrus</i>	-	55 (feuilles)	-	Vanselow (1966)
<i>Fagopyrum esculentum</i> (blé noir, sarrasin)	0.5 > 5.87	- -	chloroses retard de croissance, voire mort du plant	Cotton (1930) Cotton (1930)
<i>Glycine hispida</i> (soja)	6	600 (racines)	-	Cataldo <i>et al.</i> (1978)
<i>Hordeum</i> (orge)	8 2 - 58.71	- - >11 (feuilles) -	mort rapide - - germination diminuée	Wolfé (1913) Brenchley (1938) Beckett & Davis (1977) Agarwala <i>et al.</i> (1961)
<i>Lactuca sativa</i> (laitue)	0.88	-	retard de croissance de 50 %	Berry & Wallace (1989)
<i>Linum usitatissimum</i> (lin)	0.5-5.0	-	-	Millikan (1949)
<i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	0.5	-	-	Chang & Sherman (1953)
<i>Medicago sativa</i> (luzerne)	-	> 44 (feuilles)	retard de croissance	Halstead <i>et al.</i> (1969)
<i>Nicotiana tabacum</i> (tabac)	>3	-	-	Soane & Saunders (1959)
<i>Phaseolus vulgaris</i> (haricot)	2 0.03	- -	- retard de croissance	Brenchley (1938) Wallace & Abou-Zamzam (1989)
<i>Zea mays</i> (maïs)	2	-	-	Soana & Saunders (1959)

4. EFFETS TOXIQUES DU NICKEL SUR LA PLANTE

Germination. Le nickel peut être toxique pour la germination des graines. En effet, un apport excessif de 58.71 mg/l de nickel diminue la germination des grains d'orge (*Hordeum*) (Agarwala *et al.*, 1961). L'addition de 0.05 à 1.0 g de nickel à des pots contenant 4.5 kg de sol alluvial (donc 11 à 222 ppm de nickel) diminue la germination des graines de navet (*Brassica rapa*) (Kusaka *et al.*, 1971). Les effets toxiques du nickel sur la germination des graines dépendent beaucoup de l'espèce.

Croissance. La toxicité du nickel sur le développement des plantes a été signalée pour la première fois par Haselhoff (1893). Depuis, un grand nombre de publications traitant de ce sujet ont été écrites. La plupart indiquent que les symptômes se manifestent généralement par une faible croissance accompagnée de chloroses.

Mishra et Kar (1974) décrivent les principaux symptômes de toxicité du nickel comme étant une chlorose ou un jaunissement des feuilles, suivi d'une nécrose. D'autres symptômes de toxicité ont été observés, comme une faible croissance des racines et des parties aériennes, des déformations de différentes parties du plant, et des taches inhabituelles sur les tiges et les feuilles.

Chez les monocotylédones, Vanselow (1966) indique que la toxicité se manifeste souvent par une alternance de bandes vertes et jaunes claires sur les feuilles, alors que chez les dicotylédones les symptômes sont en général des chloroses en taches.

Rausser (1978) a étudié les premiers effets toxiques du nickel sur le haricot. Celui-ci manifeste une baisse de la production de matière sèche, et une orientation verticale anormale des feuilles.

Anderson *et al.* (1973, 1979) ont étudié les symptômes de toxicité du nickel sur le développement des feuilles d'avoine (*Avena byzantina*). Un excès de nickel engendre des chloroses en bandes qui se manifestent sur la première feuille 24 heures après l'émergence du coléoptile. L'alternance du jour et de la nuit est nécessaire pour le développement de cette chlorose en bandes. Les zones potentiellement vertes se développent dans le coléoptile durant le jour, alors que les bandes potentiellement chlorosées se développent la nuit. Les mêmes symptômes furent observés sur l'avoine par Crooke et Inkson (1955) lors d'études sur la toxicité du nickel sur des sols à serpentine d'Ecosse.

Des auteurs (Hewitt, 1948a; Millikan, 1948; Vergnano & Hunter, 1953) avancent que les chloroses causées par des excès de nickel ressemblent aux chloroses dues à des carences en fer, et pourraient donc être induites par une déficience en fer. En effet, le nickel diminue la teneur totale en fer chez l'orge (Forster, 1954) et l'avoine (Crooke, 1955; Roth, Willihan & Sharpless, 1971).

5. RELATIONS ENTRE LE SOL ET LA TENEUR EN NICKEL DANS LA PLANTE

Selon Swaine (1955), les sols contiennent normalement de 5 à 500 ppm de nickel (5 à 500 mg/kg de sol), avec une moyenne autour de 100 ppm. Cependant, les serpentines et plus généralement les sols dérivant de péridotites comme les sols ferrallitiques ferritiques du sud de la Nouvelle-Calédonie, contiennent couramment plusieurs milliers de ppm de nickel, voire quelques dizaines de milliers de ppm (Bourdon, 1990).

La disponibilité du nickel pour la plante dépend : (a) de la quantité totale de nickel présente dans le sol (Masuda & Sato, 1962; Roth *et al.*, 1971); (b) du type de sol et de ses propriétés, notamment le pH et la teneur en matière organique (Masuda & Sato, 1962; Halstead *et al.*, 1969).

La quantité de nickel présente dans la plante est le reflet partiel de celle présente dans le sol. Warren et Delavault (1954) ont examiné les teneurs en nickel d'une végétation poussant sur plusieurs types de sols au Canada. Ils ont mis en évidence des corrélations généralement bonnes entre les teneurs en nickel dans les plantes et les teneurs dans les sols.

En fait, l'assimilation du nickel par la plante ne dépend pas de la quantité totale de nickel présente dans le sol, mais plutôt de la quantité de nickel échangeable dans le sol. Se pose alors le problème du choix de la technique d'extraction du nickel du sol de façon à ce qu'elle soit la plus représentative du nickel dit échangeable. Normalement, les techniques d'extraction du nickel du sol qui donnent les meilleures corrélations entre la teneur en nickel dans le sol et la teneur dans les feuilles sont celles à l'eau distillée ou à l'acide acétique. En effet, Haq *et al.* (1980) ont comparé 9 techniques d'extraction du nickel du sol différentes avec les teneurs en cet élément dans la betterave (*Beta vulgaris*) : ainsi, le nickel du sol extrait à l'acide acétique rend compte de 42 % du nickel présent dans la plante, et celui extrait à l'eau distillée représente 38 %. Toutefois, alors que Spence et Millar (1963) n'ont observé aucun symptôme de toxicité sur l'avoine cultivé sur des sols ayant 300 ppm de nickel extractible à l'acide dilué, Hunter (1954) a mis en évidence des symptômes de toxicité due au nickel sur l'avoine cultivé sur des sols contenant moins de 10 ppm de nickel extrait à l'acétate d'ammonium. Les différentes techniques d'extraction du nickel pour évaluer le Ni assimilable semblent donc dépendre beaucoup du type de sol.

Par ailleurs, la disponibilité du nickel dépend aussi des caractéristiques du sol. Ainsi, des valeurs de pH du sol inférieures à 5.6 semblent favoriser l'assimilation du nickel, contrairement aux valeurs supérieures à 5.6 (Mizuno, 1967; Masuda & Sato, 1962). La teneur en nickel échangeable du sol augmente donc avec son acidité. Crooke (1956) a mis en évidence que la croissance de l'avoine sur serpentinite est améliorée par des apports de chaux, de CaCO₃ ou de Na₂CO₃ qui augmentent le pH du sol.

Halstead *et al.* (1969) ont étudié l'effet des propriétés du sol sur l'extraction du nickel, en utilisant l'acétate d'ammonium comme extractant. Ils ont observé que le chaulage, l'apport de matière organique et de phosphate réduisent la quantité de nickel extrait des sols. Par contre, l'addition de gypse, qui a tendance à diminuer le pH du sol, entraîne une augmentation de la disponibilité du nickel (Masuda & Sato, 1962).

Généralement, l'apport de nickel avec les boues de stations d'épuration, même si la majeure partie de cet élément est liée à la matière organique, occasionne une augmentation des teneurs en nickel dans les racines et les parties aériennes de la plupart des plantes cultivées (Page, 1974; McLean & Dekker, 1978; Soon *et al.*, 1980). Les sols tolérant le mieux les boues de stations d'épuration riches en nickel, c'est à dire dans lesquels la disponibilité de cet élément pour la plante sera faible, sont ceux qui ont un pH neutre à alcalin et avec une forte teneur en matière organique.

6. INTERACTIONS ENTRE LE NICKEL ET CERTAINS ELEMENTS

Des interactions entre le nickel et certains éléments peuvent augmenter la toxicité du nickel ou au contraire la diminuer. Une augmentation plus forte qu'un simple effet additif est appelée synergie, alors qu'une diminution à un niveau plus faible qu'un effet additif est appelée antagonisme. Par exemple, lorsque deux éléments à une certaine concentration entraînent chacun, séparément, 10 % de retard de croissance sur une plante, alors, une fois combinés, soit le retard de croissance est de 20 % si leur effet est additif; soit le retard est supérieur à 20 % s'il y a synergie; soit le retard est inférieur à 20% s'il y a antagonisme.

Quelques exemples d'interactions sont décrits dans la littérature, même si relativement peu de recherches ont été réalisées dans ce domaine.

azote, phosphore, potassium. L'apport de phosphate comme fertilisant diminue la teneur en nickel dans le blé, alors que l'azote a l'effet inverse (Tokovoi & Maiboroda, 1963).

Par contre, selon Crooke *et al.* (1954), plus les teneurs en phosphore dans la plante sont élevées, plus la toxicité du nickel est importante.

En culture sur sable avec l'avoine comme plante test (Crooke & Inkson, 1955), le poids de matière sèche est considérablement réduit avec 2.5 mg/l de nickel. Cet effet est encore plus important quand la solution nutritive est pauvre en potassium.

calcium. Un excès de nickel entraîne une augmentation de la teneur en calcium dans l'avoine (Knight & Crooke, 1956) et dans la tomate (Crooke, 1958).

Par contre, le nickel provoque une diminution de l'assimilation du calcium par le pois (Crooke, 1958).

Par ailleurs, Crooke (1956) a montré qu'un apport de calcium influence principalement le pH du sol.

Heikal *et al.* (1989) ont mis en évidence une diminution de la toxicité du nickel sur la laitue par des apports de CaCl_2 . En effet, à 0.88 mg/l de nickel, la laitue accuse un retard de croissance de 50 %. Par contre, en présence de 0.94 g/l de calcium et de la même dose de nickel, le retard de croissance n'est plus que de 10 %.

De même, un apport croissant de CaO de 4 à 12 t/ha sur un vertisol hyper-magnésien entraîne une baisse très significative de la teneur en nickel dans les grains de maïs (Bonzon *et al.*, 1991).

magnésium. Proctor et McGowan (1976) ont mis en évidence que le magnésium diminue la toxicité du nickel sur l'avoine. En effet, les symptômes de toxicité observés à la dose de 1.5 mg/l de nickel sont atténués voire annulés avec 7.5 mM de magnésium (182 mg/l).

fer. Les chloroses dues à des excès de nickel pourraient être induites par une déficience en fer. En effet, le nickel diminue la teneur totale en fer dans l'orge (Forster, 1954) et l'avoine (Crooke, 1955; Roth, Willihan & Sharpless, 1971). Des expériences avec des isotopes du fer (^{59}Fe) ont montré que le nickel inhibe l'absorption et le transport du fer dans le riz (Chino & Mitsui, 1967).

Cependant, il semble que ce ne soit pas toujours le cas, puisque Crooke et Knight (1955) ont observé que la teneur totale en fer varie peu dans des plants d'avoine montrant des symptômes de toxicité dus au nickel. Il semblerait que seules les zones chlorosées ou nécrosées soient carencées en fer. En fait, Crooke, Hunter et Vergnano (1954) ont démontré que la chlorose produite par le nickel et d'autres métaux lourds était surtout due à une réduction de la disponibilité du fer dans le tissu.

cobalt. Russel *et al.* (1968) ont constaté qu'un excès de nickel entraîne une diminution de la teneur en cobalt dans l'aulne (*Alnus rubra*) et que cet excès de Ni interfère sur l'incorporation du cobalt dans la vitamine B_{12} .

Par contre, une pulvérisation d'une solution de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ sur des plants de tomate et de concombre (*Cucumis sativus*) augmente leur teneur en nickel (Terent'eva, 1963).

cuivre. Sokolova et Yatsyuk (1965) ont observé qu'une élévation de la quantité de cuivre dans plusieurs plantes entraîne une augmentation de la teneurs en nickel. Les nécroses foliaires dues à l'excès de nickel sont beaucoup plus marquées en présence de cuivre.

manganèse. Hewitt (1953) a observé des symptômes de déficience en manganèse sur les feuilles de tomate et de pomme de terre en présence d'un excès de nickel.

molybdène. Il existe un antagonisme entre le molybdène et le nickel dans certains végétaux (Sato, 1969). Des applications de solutions de molybdène en pulvérisation foliaire ou en rajout dans le sol permettent de réduire les symptômes de toxicité du nickel habituellement observés, en particulier lorsqu'il y a une déficience induite en fer (Ishihara *et al.*, 1969).

De plus, Sato (1969) observe chez les agrumes, qu'une pulvérisation foliaire de solution de molybdène diminue le trouble nutritionnel causé par un excès de nickel.

7. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES SOLS FERRALLITIQUES DU SUD DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE

De nombreux sols du Territoire, comme les vertisols magnésiens (Bonzon *et al.*, 1991), les sols bruns eutrophes, les sols ferrallitiques ferritiques du Sud, contiennent couramment plusieurs milliers de ppm de nickel. Toutefois, les sols ferrallitiques sont ceux qui en contiennent le plus avec des teneurs dépassant souvent les 10 000 ppm (Latham *et al.*, 1978; Bourdon, 1990). Mais la plus grande partie de ce nickel est sous forme amorphe non assimilable, et de très faibles quantités se retrouvent dans les plantes cultivées : quelques ppm à quelques dizaines de ppm. Néanmoins, ces quantités peuvent suffire pour nuire au bon développement d'une plante.

Il faut noter la grande différence d'assimilation du nickel existant entre les plantes cultivées et les plantes endémiques qui se sont progressivement adaptées aux sols ferrallitiques. En effet, celles-ci ont souvent de très fortes teneurs en nickel dans leurs tissus, pouvant dépasser les 10 000 ppm pour les plantes dites hypernickelophores (Jaffré, 1980).

Aucune technique d'extraction du nickel de ce type de sol n'a encore été mise au point pour évaluer sa fraction assimilable.

On ne connaît pas non plus l'influence du pH sur l'assimilabilité du nickel dans ces sols, ni celle de la matière organique. Etant donné que la valeur du pH est souvent proche de 5,0, on peut craindre que celui-ci soit à un niveau favorisant la solubilisation du nickel. Par ailleurs, la teneur en matière organique est généralement faible dans ces sols, et située en surface. Par conséquent, un apport de matière organique pourrait jouer un rôle important sur la disponibilité du nickel.

Des interactions avec d'autres éléments présents à des teneurs non négligeables dans ces sols, comme le manganèse, sont possibles. Par ailleurs, Gourdon *et al* (1991) constatent que les très fortes fumures phosphatées nécessaires à la levée de la carence en phosphore d'un sol ferrallitique ferritique - type du sud de la Nouvelle-Calédonie entraînent chez le maïs une diminution de la teneur en nickel (mais aussi en fer et en chrome, tandis que les teneurs en cobalt et manganèse augmentent). Ceci est dû à la très forte fixation du P_2O_5 sur les oxydes de fer et probablement de nickel, diminuant ainsi la disponibilité du Ni.

8. CONCLUSION

Les teneurs normales en nickel dans les plantes cultivées varient donc, en moyenne, de 0.05 à 5.0 ppm (Vanselow, 1966). De fortes variations existent toutefois entre les espèces, et même entre les différents organes d'une plante. La teneur peut aussi varier en fonction de l'âge de la plante ou celui de l'organe.

Les teneurs toxiques en nickel dépendent elles aussi fortement de l'espèce. On peut cependant craindre qu'une teneur en nickel dans un tissu soit excessive lorsqu'elle avoisine ou excède les 50 ppm (Vanselow, 1966). Par ailleurs, quelques mg de nickel par litre de solution suffisent à être toxiques pour de très nombreuses plantes.

Les principaux symptômes de toxicité sont des chloroses, suivies de nécroses des feuilles, accompagnées par des retards de croissance, voire des déformations de différentes parties du plant (Mishra & Kar, 1974). Ces différents symptômes semblent spécifiques à chaque espèce.

La disponibilité du nickel dans un sol dépend du type de sol en question, et de ses caractéristiques physico-chimiques : un pH inférieur à 5.6 semblerait favoriser la solubilisation du nickel (Mizuno, 1967; Masuda & Sato, 1962); une forte teneur en matière organique semble, au contraire, diminuer sa disponibilité (Halstead *et al.*, 1969).

Les interactions entre le nickel et d'autres éléments sont très nombreuses et tout aussi complexes.

Les problèmes de la toxicité du nickel ne sont donc pas simples. Proctor et Woodell (1975) ont d'ailleurs mis l'accent sur la complexité des facteurs qui peuvent causer une toxicité due au nickel sur serpentines, et la difficulté d'expliquer celle qui apparaît en un site particulier.

Aucune recherche pour étudier cette toxicité sur sol ferrallitique ferritique n'a été effectuée à ce jour. La première démarche pour aborder cette étude pourrait être de déterminer la courbe de croissance du maïs cultivé sur un sol recevant des doses croissantes de nickel, afin de caractériser les symptômes de toxicité sur le maïs, déterminer les teneurs toxiques et normales en nickel dans les tiges et feuilles, et éventuellement mettre en évidence certaines interactions entre l'assimilation du nickel et celle d'autres éléments. Par la suite, le rôle de la matière organique pourrait être étudié, ainsi que l'influence d'amendements calciques - donc celle du pH - sur la disponibilité du nickel dans ce type de sol. Les interactions entre le nickel et certains éléments ne doivent pas être négligées, comme celles entre le nickel et les éléments majeurs apportés par les engrais, mais aussi entre le nickel et certains éléments déjà présents dans ce sol à des teneurs relativement fortes, comme le manganèse, le chrome ou le cobalt. Par ailleurs, il serait intéressant de connaître, pour de nombreuses espèces cultivées, les teneurs normales en nickel, les teneurs phytotoxiques, ainsi que les différents symptômes de toxicité, afin de pouvoir les comparer avec les teneurs et les éventuels symptômes obtenus chez ces mêmes espèces cultivées sur sol ferrallitique. Enfin, la mise au point d'une méthode de dosage de nickel dit échangeable des sols ferrallitiques du Sud du Territoire est aussi un problème important à résoudre.

BIBLIOGRAPHIE

- Agarwala S.C. et A. Kumar. The effect of heavy metals and bicarbonate excess on sunflower plants grown in sand culture with special reference to catalase and peroxidase, *J. Indian Botan.Sock.*, 1962, vol. 41, p. 77-92.
- Agarwala S.C., A. Kumar et C.P. Sharma. Effect of excess supply of heavy metals on barley during germination, with special reference to catalase and peroxidase ; *Nature*, 1961, vol. 191, p. 726-727.
- Anderson A.J., D.R. Meyer et F.K. Mayer. Heavy metal toxicities : levels of nickel, cobalt and chromium in the soil and plant associated with visual symptoms and variations in growth of an oat crop, *Aust.J. Agric.Res* , 1973, vol. 24, p. 557-571.
- Anderson A.J. ,D.R. Meyer et F.K. Mayer. Effects of th environment on the symptom pattern of nickel toxicity in the oat plant , *Ann. Botany* , 1979, vol. 43, p. 271.
- Asmaeva Z.I. et N.A. Il'vitskii. Levels of some major and trace element in wheat grains, *Izv Vyssh. Ucheb. Zaved.;Pishch. Tekhnol*; 1969, p19-20.
- Babov D.M., A.A. Muromtseva, M.M. Vorontsova et M.A. Bart. Trace element composition of some vegetables grown in chenezem soil of the Odessa region ; *Vop.Pitan.*, 1970, vol. 29, p. 81-83.
- Beckett P.H.T. et R.D. Davis. Upper critical concentration of toxic elements in plants, *New Phytologist*,1977, vol. 79, p. 95.
- Berry W.L. et A. Wallace. Interaction of the yield response surface of lettuce with high and toxic concentrations of zinc and nickel, *Soil Science*, 1989, vol. 147, No 6, p. 398-400.
- Bonzon B., L. Collet, C. Boucaron, F. Gourdon, P. de Monpezat et L. L'Huillier. Etude des effets des amendements calciques sur un vertisol hyper-magnésien. Résultats du cinquième cycle cultural de l'expérimentation au champ. *Conventions Sciences de la Vie, Agropédologie, ORSTOM*, 1991, N°10, 74 p.
- Bourdon E. Variations morphologiques et physico-chimiques des sols d'une parcelle d'expérimentation de la vallée de la Coulée (Sud de la Nouvelle-Calédonie), *Conventions Sciences de la Vie, Agropédologie, ORSTOM*, 1990, N°5, 36 p.
- Brenchley W.E. Comparative effects of cobalt, nickel and copper on the plant growth; *Ann.Appl.Biol.*; 1938, vol. 18, p. 671-694.
- Brenchley W.E. The essential nature of certain minor elements for plant nutrition, *Bot.Rev*, 1947, II vol. 13, p. 169-193.
- Cataldo D., T. Garland, R. Wildung et H. Drucker. Nickel in plants. II. Distribution and chemical form in soybean plants, *Plant Physiol* , 1978, vol. 60, p. 566-570.
- Chang A.T. et G.D. Sherman. The nickel content of some Hawaiian soils and plants and the relation of nickel to plant growth, *Hawaii Agr.Expt.Sta.Tech.Bull*, 1953, N°19, p. 3-25.
- Chino M. et S. Mitsui. Occurrence of heavy metal induced iron chlorosis in plants. II. Effects of heavy metal excess on absorption, translocation and distribution of ⁵⁹Fe in rice plants, *Nippon Dojo Hiryougaki Zasshi*, 1967, vol. 38, p. 255-259.
- Cotton M. Toxic effects of iodine and nickel on Buckwheat grown in solution cultures, *Torrey Bot.Club Bull.*, 1930, vol 57, p. 127-140.
- Crooke W.M. Effect of nickel versenate on oat plants, *Nature*,1954, vol. 173, p. 403-404.
- Crooke W.M. Effect of soil reaction on uptake of nickel from a serpentine soil, *Soil Sct.*, 1956, vol. 81, p. 269-276.
- Crooke W.M. Effect of heavy metal toxicity on the cation exchange capacity of plant roots, *Soil Science*, 1958, vol. 86, p. 231-241.
- Crooke W.M., J.G. Hunter et O. Vergnano. The relationship between nickel toxicity and iron supply, *Ann.Appl.Biol.*, 1954, vol. 41, p. 311.
- Crooke W.M. et R.H.E. Inkson. Relation between nickel toxicity and major nutrient supply , *Plant and Soil*, 1955, vol. 6, p. 1-15.
- Crooke W.M. et A.H. Knight. The relation between nickel toxicity symptoms and the absorption of iron and nickel, *Ann.Appl.Biol.*, 1955, vol. 43, p. 454-464.
- Dixon N.E., E.C. Gazzola, R.L. Blakeley et B. Zarer. Jack bean urease (E.C. 3.5.1.5), a metalloenzyme, a simple biological role for nickel?, *J.Am.Chem.Soc*, 1975, vol. 97, p. 4131.
- Estañ M., M.C. Bolarin et M.G. Guillen. Efectos del níquel en pimiento (*Capsicum annum* L), *Agrochimica*, 1988, Vol XXXII, N°5-6, p.379-390.
- Foster W.A. Toxic effect of heavy metals on crop plants grown in soil culture, *Ann.Appl.Biol.*, 1954, vol. 41, p. 637-641.
- Golovchenko V.P. et C.V. Cherednichenko. Content of trace elements in various plant organs, *Dokl.Akad.Nauk.SSSR*, 1962, vol. 146, p. 1223-1226.

- Gourdon F., G. Pujol, C. Boucaron, B. Bonzon, L. L'Huillier et L. Collet. Mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du Sud de la Grande Terre. Carences en phosphore et en silice : résultats des deux premières études expérimentales en serre, *Conventions Sciences de la Vie, Agropédologie, ORSTOM*, 1991, N°9, 53 p.
- Guha M.M. et R.L. Mitchell. Trace and major elements composition of the leaves of some deciduous trees. II. Seasonal changes, *Plant and Soil*, 1966, vol. 24, p. 90-112.
- Halstead R.L., B.J. Finn et A.J. McLean. Extractibility of nickel added to the soils and its concentration in plants, *Can. J. Soil Sci.*, 1969, vol. 49, p. 335-342.
- Haq A.V., T.E. Bates et Y.K. Soon. Comparison of extractants for plant-available Zn, Cd, Ni and Cu in contaminated soils, *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1980, vol. 44, p. 772-777.
- Hara T. et Y. Sonoda. Comparison of the toxicity of heavy metals to cabbage growth, *Plant and Soil*, 1979, vol. 51, p. 127.
- Haselhoff E. Versuche über die schädliche Wirkung von nickelhaltigem Wasser auf Pflanzen, *Landw. Jahrb.*, 1893, vol. 22, p. 1862-1868.
- Heikal M.M.D., W.L. Berry, A. Wallace et D. Herman. Alleviation of nickel toxicity by calcium salinity, *Soil Science*, 1989, vol. 147, No 6, p. 413-415.
- Hewitt E.J. Relation of manganese and some other metals to the iron status of plants, *Nature*, 1948a, vol. 161, p. 489-490.
- Hewitt E.J. Metal interrelationships in plant nutrition. I. Effects of some metal toxicities on sugar beet, tomato, oat plant, potato and narrow stem kale grown in sand culture, *J. Exptl. Bot.*, 1953, vol. 4, p. 59-64.
- Hunter J.G. Nickel toxicity in a Southern Rhodesian soil, *S. African J. Sci.*, 1954, vol. 51, p. 133-135.
- Hunter J.G. et O. Vergnano. Nickel toxicity in plant, *Ann. Appl. Biol.*, 1952, vol. 39, p. 279-284.
- Hutchinson T.C. Nickel. In effect of heavy metal pollution on plants, England: Leep N.W., 1981, Vol 1 effect of trace metals on plant function, p.171-203.
- Hutchinson T.C. et L.M. Whitby. Heavy metal pollution in the Sudbury mining and smelting region of Canada. I. Soil and vegetation contamination by nickel, copper and other metals, *Environ. Cons.*, 1974, vol. 1, p. 123-132.
- Ishihara M., Y. Hase, H. Yomoto, S. Konno et K. Sato. Chlorosis of Japanese pear trees in serpentine soil. II. Effects of the application of nickel, chromium, slaked lime and molybdenum treatment on the growth and tree composition of Japanese pear trees grown in serpentine soil, *Engel Shikenjo Hokoku, Ser.*, 1969, No 8, p. 31-52.
- Jaffré T. Etude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie, *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, 1980, No 124, p. 160-180.
- Karetnikov P.V. et M.M. Dmitrichenko. Content of some trace elements in cedar nuts, *Vop. Pitan.*, 1966, vol. 25, p. 79-80.
- Karvanek M. et J. Bohmova. The contents of copper, iron, nickel, manganese, zinc and molybdenum in spinach leaves. *Sb. Vys. Sk. Chem. Technol., Potravniny.*, 1966, vol. 11, p. 73-82.
- Karvanek M. et G. Janicek. Chemistry of oats and their products. XIV. Effect of locality and variety on the content of some trace elements in oat grains. *Sb. Vys. Sk. Chem. Technol., Potravniny*, 1968, vol. 24, p. 65-75.
- Keeney D.R. et L.M. Walsh. Heavy metal availability in sewage sludge amended soils. In : *Internat. Conf. on heavy Metals in the Environment, vol 2, Pathways and Cycling*; (T.C Hutchinson ed), Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1975, p. 379-403.
- Knight A.H. et W.M. Crooke. Interaction between nickel and calcium in plants, *Nature*, 1956, vol. 178, p. 220.
- Kulik A.A. et T.P. Barabash. Content of trace elements in Gornyi Altai apples. Tr 1-oi (Pervoi) Vses. Konf. Po Biol. Aktivnym Yeshchestvam Plodov i Yogod, Sverdlovsk, 1961, p. 119-124.
- Kusaka S., M. Maekawa et S. Sono. Toxicities of heavy metal on crops. I. Toxicities of excess zinc, nickel, chromium and titanium on turnip plant. Hyogo Kenritsu Nogyo Shikenjo Kenkyu Hokoku, 1971, vol. 18, p. 71-74.
- Latham M., P. Quantin et G. Aubert. Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie, *Notice explicative N° 78, ORSTOM Paris*, 1978.
- Los L.I., L.K. Pyatnitskaya et A.S. Samsonova. The content of certain trace elements in vegetable foods. *Vopr. Pitaniya*, 1966, vol. 25, p. 84-85.
- Maksudov N.Kh., I.P. Pogorelks et P.Kh. Yuldashev. A chemical investigation of *Artemisia scoparia*, *Usbeksk. Khim. Zh.*, 1962, vol. 6, p. 84-86.
- Martini A. Der phytomikrochemische Nachweis des Nickels und sein Vorkommen im Pflanzenreich, *Mikrochemie*, 1930, vol. 8, p. 41-45.
- Masuda T. et R. Sato. The injury to growth of plants on serpentine soil (preliminary report), Survey of soil and growth injury, Hokkaido-ritsu Nogyo Shikenjo Shuho, 1961, vol. 8, p. 37-48.

- Masuda T. et R. Sato. Crops grown on serpentine soil. I. Mutual relations between Ni, Ca and Mg, *Nippon Dojo Htryokoku Zasshi*, 1962, vol. 33, p. 201-204.
- McLean A.J. et A.J. Dekker. Availability of zinc, copper, and nickel to plants grown in sewage-treated soils, *Can. J. Soil. Sci.*, 1978, vol. 58, p. 381-389.
- Millikan C.R. Antagonism between molybdenum and certain heavy metals in plant nutrition, *Nature*, 1948, vol. 161, p. 528.
- Millikan C.R. Effects on flax of a toxic concentration of cobalt, nickel, etc. in the nutrient solution, *Proc. Roy. Soc. (Victoria)*, 1949, vol. 61, p. 25-42.
- Mishra D. et M. Kar. Nickel in plant growth and metabolism, *The Botanical review*, october-december 1974, vol. 40, No 4, p.395-452.
- Mizuno N. Chemical characteristics of serpentine soil in Hokkaido. I. The difference of contents of nickel and molybdenum in plants and soils. Hokkaido-ritsu Nagyo Shikensho Shuho, 1967, vol. 15, p. 48-55.
- Mursaliev A.M. Distribution of some chemical elements in soils and plants of the Kirgiz SSR, *Rast. Resur. Kirg.* edited by Lebedeva, L.P.Izd. "Ilim". Frunza, USSR, 1969, p. 74-75.
- Page A.L. Fate and effects of trace elements in sewage sludge when applied to agricultural lands, US Environmental Protection Agency, Report EPA-670/2-74-005, Cincinnati, Ohio, 1974,.
- Paribok T.A. et G.N. Kuznetsova. Effect of soil temperature on the absorption and distribution of trace elements in plants. *Tr. Botan. Inst., Akad. Nauk SSSR, Ser. 4, Ekspertim. Botan.*, 1963, vol. 16, p. 27-48.
- Petrova R. et S. Radenkov. Zinc, nickel, cobalt and molybdenum content of apple trees grown on alluvial and brown soils, *Gradinar. Lozar. Nauk.*, 1969, vol. 6, p. 115-117.
- Prince A.L. Influence of soil types on the mineral composition of corn tissues as determined spectrographically, *Soil Sci.* 1957, vol. 83, p. 399-404.
- Proctor J. et S.R.J. Woodell, The ecology of serpentine soils, *Adv. Ecol. Res.* , 1975, vol. 9, p. 255-365.
- Proctor J. et I.D. Mc Gowan. Influence of magnesium on nickel toxicity, *Nature*, march 11 1976, vol. 260, p.134.
- Pyatnitskaya L.K. Levels of some trace elements in vegetables and fruits of the Saratov region, *Vop. Pitan.*, 1970, vol. 29, p. 83-85.
- Rausser W.E. Early effects of phytotoxic burdens of cadmium, cobalt, nickel and zinc in white beans, *Can. J. Bot.* , 1978, vol. 56, p. 1744-1749.
- Rausser W.E. et C.A. Ackerley. Localization of cadmium in granules within differentiating and mature root cells, 1989, *Can.J.Bot.*, vol. 65, p. 643-646.
- Roth J.A., E.F. Williham et R.G. Sharpless. Uptake by oats and soybeans of copper and nickel added to a peat soil, *Soil Sci.*, 1971, vol. 112, p. 338-342.
- Rush V.A. et V.V. Lisunova. Micro and trace elements in Cedar nuts, *Vop. Pitan.*, 1969, vol. 28, p. 52-55.
- Russel S.A., H.J. Evans et P. Mayeux. Effect of cobalt and certain other trace metals on the growth and vitamin B₁₂ content of *Alnus rubra*, *Biol. Alder. Proc. Symp. Northwest Sci. Ass. Annu. Med.* , 40th, edited by J.M Trappe, 1968, p. 259-272.
- Sainko G.N., A.V. Karyakin, V.E. Krauya et M.M. Farafonov. Distribution of some metals in plants, *Fiziol. Rast.*, 1968, vol. 15, p. 139-144.
- Salim R., M. Haddad et I. El-Khatib. Effect of nickel treatment on the growth of egg-plant, *J Environ Sci Health*, 1988 , vol. A23, No 4, p. 369-379.
- Sarkunan V., A.K. Misra et P.K. Nayar. Interaction of zinc copper and nickel in soil on yield and metal content in rice; *J.Environ.Sci.Health*; 1989; Vol A24; No 5; p. 459-466.
- Sato K. Antagonism between nickel and molybdenum in *Citrus*, *Citrus Symp. Ist 1968*, Edited by H.D Chapman, Univ. Calif. Riverside, Calif. USA, 1969, vol. 3 , p. 1543-1550.
- Soane B.D. et D.H. Saunders. Nickel and chromium toxicity of serpentine soils in Southern Rhodesia, *Soil Sci.* , 1959, vol. 88, p. 322-330.
- Sokolova V. Yu et M.D. Yatsyuk. Accumulation of rare and scattered elements by plants, *Ukr. Botan. Zh.*, 1965, vol. 22, p. 14-18.
- Soon Y.K., T.E. Bates et J.R. Mayer. Land application of chemically treated sewage sludge. III. Effects on soil and plant heavy metal content, *J. Environ. Qual.*, 1980, vol. 49, p. 497-504.
- Spence D.H.N. et E.A. Millar. An experimental study of infertility of Shetland serpentine soil, *J. Ecol.* , 1963, vol. 51, p. 333-363.
- Suctu T. et L. Ivanof. presence of copper, nickel, zinc, cobalt and manganese in the soil and in the seeds of certain cultivated plants, *Acad. Rep. Populare Romine, Filiala Cluj, Studii Cerceterari Agron.*, 1963, vol. 14, p. 79-81.
- Swaine D.J. The trace element content of soils, *Commonwealth Bur. Soil Sci. Tech. Comm.* , 1955, No 48, HMSO, London.

- Terent'eva M.V. Effects of foliage fertilization of tomato and cucumber plants with iodine and cobalt salts upon the yield and concentration of trace elements in the fruit, *Vestst Akad. Navuk. Belarusk. SSR, Ser. Bityam. Navuk*, 1963, No 2, p. 56-58.
- Tokovoi N. et N. Maiboroda. Trace element composition of leguminous plants used for the preparation of haymeal, *Tr. Krasnoyarsk. Sel'skokhoz. Inst.*, 1962, vol. 13, p. 60-68.
- Tokovoi N. et N. Maiboroda. The action of fertilizers on trace element accumulation in wheat and other food plants, *Biol. Rol Mikroelementov v Organizme Chelove-ka i Zhivotn. Vost Sibiri i Dal'nego Vostoka, Akad. Nauk SSSR, Sibirsk. Otd. Komits. po Izuch. Mikroelementov, Buryatsk. Kompleksn. Nauchn. Issled. Inst., Tr. Konf., Ulan-Ude* 1962, 1963, p. 125-192.
- Vanselow A.P. Nickel. In : *Diagnostic Criteria for Plants and Soils. University of California, Division of Agric. Sci* edited by H.D Chapman , 1966, p. 302-309.
- Vergnano O. Action of nickel on plants in serpentine soils, *Nuovo gtron. Botan. Ital.* , 1953, vol. 60, p. 109-183.
- Wallace A. et A.M. Abou-Zamzam. Low levels but excesses of five different trace elements, singly and in combination, on interactions in bush beans grown in solution culture, *Sol Science*, 1989, vol. 147, No 6, p. 439-441.
- Warren H.V. et R.E. Delavault. Variations in the nickel content of some Canadian trees , *Trans. Royal Soc. Can.*, 1954, vol. XLVIII, p. 71-74.
- Williams P.C. Nickel, iron and manganese in the metabolism of the oat plant, *Nature*, 1967, vol. 214, p. 628.
- Wolfe J. The influence of iron in the development of barley, and the nature of its action, *Compt. Rend. Acad. Sci Paris.*, 1913, vol. 157, p. 1022-1024.

