

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 44

1998

**Mise en valeur des sols dérivés
des massifs ultrabasiques
du Sud de la Nouvelle-Calédonie**

Détermination de la sensibilité des plantes cultivées
aux métaux (Ni, Mn)

2- Résultats sur des espèces maraîchères, fruitières
et fourragères.

Laurent L'HUILLIER

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 294-PVF/DDR
Notifiée le 12 novembre 1996
Avenant 1 du 6 novembre 1996

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 44

1998

**Mise en valeur des sols dérivés des massifs
ultrabasiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie**

Détermination de la sensibilité des plantes cultivées aux
métaux (Ni, Mn)

2- Résultats sur des espèces maraîchères, fruitières et
fourragères.

Laurent L'HUILLIER

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 294-PVF/DDR
Notifiée le 12 novembre 1996
Avenant 1 du 6 novembre 1996



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

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1998

/L'huillier, L.

Mise en valeur des sols dérivés des massifs ultrabasiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie

Détermination de la sensibilité des plantes cultivées aux métaux (Ni, Mn)
2- Résultats sur des espèces maraîchères, fruitières et fourragères.

Nouméa : ORSTOM. juin 1998. 44 p.

Conv : Sci. Vie ; Agropédol. ; 44

SOL FERRALLITIQUE FERRITIQUE ; NICKEL ; MANGANESE ; PLANTE CULTIVEE ; TOXICITE /
NOUVELLE CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
juin 1998



ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

AVANT PROPOS

Ce rapport rend compte des résultats obtenus en 1997 au Laboratoire d'Agropédologie du Centre ORSTOM de Nouméa, concernant l'étude des toxicités métalliques.

Ils s'inscrivent dans le cadre de l'avenant 1 à la convention de recherche Province Sud / ORSTOM pour « **l'étude de l'influence sur le comportement des plantes cultivées des contraintes chimiques et physiques des sols dérivés des massifs ultrabasiques** », et plus particulièrement dans le cadre de la deuxième opération - concernant **l'étude des toxicités métalliques susceptibles de limiter le développement des espèces cultivées sur les sols oxydiques et/ou magnésiens**.

Ont contribué à la réalisation de ce travail : Joseph Ouckewen, Léon Taputuarai et William Nigote du Laboratoire d'Agropédologie.

Par ailleurs, la publication du rapport a fait appel aux services de J-P. Mermoud et Noël Galaud pour l'édition.

PLAN

RÉSUMÉ	3
DOCUMENTS ANTERIEURS.....	4
1. INTRODUCTION	5
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	6
2.1. <i>Matériel végétal et conditions de culture</i>	6
2.2. <i>Teneur en Ni dans la plante</i>	7
2.3. <i>Analyse statistique</i>	7
3. RÉSULTATS.....	9
3.1. Symptômes de toxicité au nickel (Ni)	9
3.2. Symptômes de toxicité au manganèse (Mn)	10
3.3. Croissance.....	12
3.3. Teneurs en nickel dans la plante.....	12
4. DISCUSSION.....	29
5. CONCLUSION.....	31
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	34
ANNEXES	36

RÉSUMÉ

Les effets toxiques du nickel (Ni) et du manganèse (Mn) sur la croissance de plusieurs espèces cultivées ont été étudiés. Dix-sept espèces ont été cultivées pendant 14 à 86 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations de Ni. Les effets de Mn ont été étudiés sur une première espèce.

Les symptômes de toxicité de Ni sont généralement représentés par des chloroses foliaires, généralement sur les jeunes feuilles chez les monocotylédones, et plutôt sur les feuilles les plus âgées chez les dicotylédones. S'agissant de Mn, les symptômes de toxicité sont des spots chlorotiques sur les feuilles, voire nécrotiques, jaunes à bruns. Ces symptômes apparaissent généralement en même temps voire après la diminution de la croissance, si bien qu'il n'y a pas de diagnostic précoce possible.

Des différences importantes de tolérance à Ni ont été mises en évidence au niveau de la croissance des différentes espèces. Il apparaît l'ordre suivant : (1) plantes très sensibles : melon et siratro ; (2) plantes sensibles : tomate, courgette, squash, Bigaradier Gou Tou, *Leucaena* et *Dolichos* ; (3) plantes moyennement sensibles : Citrange Troyer, Rough lemon, *Citrus volkameriana*, *Poncirus trifoliata*, Lime rangpur, Litchi, et *Sesbania sesban* ; (4) plantes tolérantes : Rhodes et surtout blé.

Les dicotylédones les plus sensibles montrent une diminution très importante de leur croissance dès 2,5 μM Ni. Des concentrations en Ni équivalentes, et même supérieures, sont rencontrées dans les solutions de sol ferrallitique ferritique. Il est ainsi certain que les plantes les plus sensibles sont intoxiquées sur ces sols dans les zones où Ni est le plus disponible.

Le manganèse en solution est beaucoup moins toxique que Ni (début de toxicité avec 125 μM de Mn sur Citrange Troyer). Toutefois, Mn est un élément dont la disponibilité dans les sols ferrallitiques ferritiques peut être élevée. Il convient donc d'être encore prudent sur les risques de toxicité de Mn sur ces sols et ceux dérivant des massifs ultrabasiques.

La tolérance au nickel est bien corrélée avec une faible teneur en Ni dans les feuilles. La sélection de plantes transportant faiblement Ni vers les parties aériennes peut donc être une voie intéressante pour diminuer à la fois les effets phytotoxiques du nickel et le flux de Ni du sol vers les parties aériennes (donc son entrée dans la chaîne alimentaire).

Mots-clés : nickel, manganèse, métaux, toxicité, plante cultivée, sols ferrallitiques ferritiques, roches ultrabasiques, Nouvelle-Calédonie.

DOCUMENTS ANTERIEURS

L'Huillier L. 1997. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Évaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées. 1. Premiers résultats sur des espèces maraîchères. Nouméa: ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie Agropédol.* **35** : 33 pp.

1. INTRODUCTION

L'importance biologique et le caractère essentiel¹ du nickel (Ni) pour les organismes vivants ont été souvent étudiés. A faible concentration, le nickel est en effet un élément nutritif essentiel pour plusieurs végétaux supérieurs (Brown *et al.*, 1987), ainsi que pour les animaux et l'homme (Solomons, 1984).

Mais il peut être toxique à forte concentration pour tous les organismes vivants (Hammond and Foulkes, 1986) et en particulier pour les plantes (Foy *et al.*, 1978; L'Huillier, 1994).

Ces travaux sur la sensibilité aux métaux des plantes cultivées, engagés dans le cadre de la Convention Province Sud / Orstom pour l'étude de la mise en valeur des sols dérivés des massifs ultrabasiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie, ont été motivés par l'extraordinaire richesse en métaux de transition de ces sols. Parmi les nombreux métaux potentiellement toxiques présents (Ni, Mn, Cr, Co...), le nickel apparaît comme l'élément ayant le plus fort potentiel de mobilité dans le sol, de disponibilité et de toxicité pour la plante (L'Huillier, 1992). Cela justifie l'intérêt particulier que nous lui portons. De plus, il a été montré que, suivant la position de ces sols dans le paysage, la mobilité du nickel est très élevée et atteint des niveaux toxiques pour les végétaux (Becquer *et al.*, 1997; Dupont et Bonzon, 1997 ; L'Huillier et Edighoffer, 1996). Le deuxième élément susceptible de poser de problèmes est le manganèse (Mn) - étant donné ses fortes teneurs dans les sols étudiés et son absorption assez élevée par les végétaux – tandis que le cobalt et surtout le chrome sont relativement peu disponibles et généralement à des teneurs dans les végétaux difficilement détectables (L'Huillier, 1992).

Les espèces végétales et les cultivars sont connus pour varier fortement dans leur sensibilité aux métaux, que ce soit le nickel (Bingham *et al.*, 1986 ; Piccini et Malavolta, 1992 ; Sauerbeck et Hein, 1991), ou le manganèse (Morris and Pierre, 1949 ; Bénac, 1976). Par conséquent, la sélection des plantes tolérantes peut être une voie très intéressante pour une meilleure exploitation agricole des sols à fortes teneurs en métaux. Mais les informations sur les plantes cultivées sont encore très peu nombreuses. Des premiers travaux prometteurs nous ont poussés à approfondir cette voie (L'Huillier, 1994 ; L'Huillier, 1997). Il est clairement apparu que les monocotylédones étaient plus résistantes au nickel que les dicotylédones, avec des variations importantes au sein de chaque groupe.

Les objectifs de cette étude sont de compléter les résultats déjà obtenus sur le nickel, et obtenir de premiers résultats sur la sensibilité des plantes au manganèse. On visera ainsi à :

- ➔ déterminer la sensibilité au nickel et au manganèse d'espèces maraîchères, fruitières et fourragères,
- ➔ déterminer la concentration en Ni et Mn dans les racines et les parties aériennes de chaque plante,
- ➔ comparer ces résultats avec les conclusions précédentes.

¹ Un élément est dit essentiel lorsque son absence empêche l'organisme de compléter son cycle de vie, entraîne des symptômes de déficiences, et lorsqu'il a un rôle défini dans le métabolisme.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel végétal et conditions de culture

Chaque expérimentation est conduite en salle de culture où les conditions sont contrôlées et identiques entre chaque expérimentation. Elles permettent donc de comparer les différentes espèces végétales avec une grande rigueur. Les espèces utilisées sont présentées dans le tableau 1.

Les graines des espèces maraîchères ont été achetées dans le commerce à Nouméa. Celles des plantes fourragères ont été fournies par le CIRAD (M. L. Desvals). Les agrumes proviennent de la Station de Recherches Fruitières de Pocquereux du CIRAD-FLHOR (M. F. Mademba-Sy). Il s'agit de porte-greffes classiquement utilisés. Les litchis ont été achetés frais (provenance Houailou). Le tableau 1 présente les espèces utilisées.

Le protocole utilisé pour chaque expérimentation est le suivant :

Les graines des espèces maraîchères sont traitées pendant 10 min avec NaOCl 1%, rincées à l'eau distillée, puis mises à germer à 28 °C sur coton humide, pendant 3 à 6 jours suivant l'espèce. Pour les agrumes, les graines extraites des fruits sont nettoyées à l'eau, puis trempées dans un bain d'eau à 52 °C pendant 10 min (élimination de certains virus, tels que Tristeza et Psorose écailleuse). Pour la conservation, les graines d'agrumes sont trempées dans une solution aqueuse contenant un fongicide, mise à sécher à l'ombre, puis conservées à 4 °C. Pour la germination, elles sont débarrassées de leurs téguments puis mises à germer sur coton pendant 11 à 14 jours. Les embryons zygotiques sont éliminés, seuls les embryons nucellaires sont conservés de manière à avoir le génotype parental (les embryons nucellaires sont reconnus par leur vigueur germinative plus forte). Les graines de Litchi, une fois séparées de la pulpe et nettoyées à l'eau, sont mises immédiatement à germer sur vermiculite pendant 23 jours. Les graines de plantes fourragères sont traitées de la même façon, avec en plus un ébouillantage avant la mise à germination pour lever la dormance de quelques espèces (Leucaena et Dolichos).

Lorsque les plantules atteignent une taille suffisante (en général les racines doivent mesurer au moins 3-4 cm et l'épicotyle au moins 2 cm), un lot homogène est sélectionné pour être mis en culture (les cotylédons des agrumes et litchi sont sectionnés pour éviter leur influence sur la nutrition et l'absorption racinaire). Les plants sont alors transférés sur des pots (5 plants par pot de 2 litres) contenant une solution de Hoagland modifiée diluée quatre fois (cf. annexe 1), aérée (un diffuseur d'air comprimé pour chaque pot), et de pH 6,0 (composition : (mM) 1 Ca; 0,25 Mg; 1,5 K; 0,5 NH₄; 3,5 NO₃; 0,5 PO₄; 0,25 SO₄; (µM) 12,5 Cl; 6,25 B; 0,5 Mn; 0,5 Zn; 0,12 Cu; 0,12 Mo; 5 Fe; 80 Na). Le nickel (NiCl₂, 6H₂O) ou le manganèse (MnSO₄, H₂O) est introduit dans les solutions dès le premier jour à différentes concentrations.

Rappels : $\mu\text{M} = \mu\text{mole/L} = 10^{-6} \text{ mole/L}$ $\begin{cases} 1 \mu\text{M Ni} = 0,058 \text{ mg / L de Ni} \\ 1 \text{ mg Ni} = 17 \mu\text{mole de Ni} \end{cases}$ $\begin{cases} 1 \mu\text{M Mn} = 0,055 \text{ mg / L de Mn} \\ 1 \text{ mg Mn} = 18,2 \mu\text{mole de Mn} \end{cases}$

Les solutions sont changées tous les 3 à 7 jours suivant l'espèce, plus précisément lorsque la conductivité de la solution diminue de plus de 15 % environ.

Les conditions de culture sont : 27 °C et 50 % d'humidité relative le jour, 22 °C et 75 % d'humidité relative la nuit, 14 h de lumière par jour à 220 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ au niveau des feuilles. Les expériences pour chaque espèce végétale consistent en des essais avec 4 à 5 traitements (doses de Ni ou Mn) et 3 répétitions (pots) par traitement.

La durée de culture sur solution dépend de l'espèce (de 14 jours pour les espèces à croissance rapide, à 86 jours pour les espèces à croissance plus lente ; cf. tableau. 2). Des mesures de croissance et des observations sont effectuées durant la culture : nombre de feuilles, taille des feuilles, longueur des racines, hauteur des parties aériennes, symptômes... A la récolte, les racines et les parties aériennes sont séparés, les racines lavées à l'eau distillée. Les poids de matière fraîche et de matière sèche (séchage pendant 24 h à 105 °C) sont déterminés.

2.2. Teneur en Ni dans la plante

Les échantillons sont broyés après le séchage et la pesée. Les analyses ont été effectuées par l'Unité de Recherche et d'Analyse (URA) du CIRAD de Montpellier, le poids des échantillons étant souvent trop faible pour pouvoir être analysés par le Laboratoire Central d'Analyse de l'Orstom à Nouméa. Les éléments sont déterminés par spectrométrie d'émission par plasma à couplage inductif (ICP), permettant d'avoir une précision de dosage de l'ordre de 0,1 ppm pour Ni et d'analyser des échantillons de faible poids (jusqu'à 0,1 g).

2.3. Analyse statistique

Les résultats des expérimentations ont été soumis à l'analyse de variance. La signification des différences entre les moyennes a été déterminée à l'aide du test t de Student au seuil de 5%.

Tableau 1. Espèces végétales utilisées pour les expérimentations.

Nom commun		Nom latin	Famille
Espèce	Variété		
Blé	QT 4097	<i>Triticum aestivum</i>	Graminée
Courgette	Clarita	<i>Cucurbita pepo</i> L.	Cucurbitacée
Melon	Magnum 45	<i>Cucumis melo</i> L.	Cucurbitacée
Squash	Delica	<i>Cucurbita maxima</i>	Cucurbitacée
Tomate	Tropic boy	<i>Lycopersicum esculentum</i> M.	Solanacée
Bigaradier	Gou Tou	<i>Citrus aurantium</i> L.	Rutacée
Citrange Troyer		<i>Citrus sinensis</i> Osb. x <i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf.	Rutacée
Volkameriana		<i>Citrus volkameriana</i> Pasq.	Rutacée
Lime Rangpur		<i>Citrus limonia</i> Osb.	Rutacée
Poncirus	Pomeroy	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf.	Rutacée
Rough lemon		<i>Citrus jambhiri</i> Lush.	Rutacée
Litchi	Kwaini	<i>Litchi chinensis</i>	Sapindacée
Dolichos	Rongai	<i>Dolichos lablab</i> L.	Papilionacée (Légumineuse)
Faux mimosa	Cunningham	<i>Leucaena leucocephala</i>	Mimosacée (Légumineuse)
Rhodes grass	Callide	<i>Chloris gayana</i>	Graminée
Sesbania		<i>Sesbania sesban</i>	Papilionacée (Légumineuse)
Siratro	Aztec atro	<i>Macroptilium atropurpureum</i>	(Légumineuse)

Tableau 2. Durée de chaque culture et stade de développement des plants témoin.

Espèce	Durée de culture (j)	Stade de développement du plant témoin (dose 0)
Blé	18	Hauteur totale des parties aériennes : 32-35 cm
Courgette	14	4-5 vraies feuilles développées, 5-6 ^e émergente (limbe de la 4 ^e = 2-7 cm)
Melon	18	4 vraies feuilles développées, 5 ^e émergente (limbe 1-4 cm)
Squash	14	4 vraies feuilles développées, 5 ^e émergente (limbe de la 3 ^e = ~ 12 cm)
Tomate	19	5 vraies feuilles développées, limbe de la 6 ^e mesurant 5-10 cm
Bigaradier Gou Tou	52	7 feuilles développées, 8 ^e émergente (1-2 cm)
Citrange Troyer	49	8-9 feuilles développées, 9-10 ^e émergente (2-3 cm)
Volkameriana	48	7 feuilles développées, 8 ^e émergente (1-2 cm)
Lime Rangpur	49	9-10 feuilles développées, 10-11 ^e émergente (2-3 cm)
Poncirus	49	10-11 feuilles développées, 11-12 ^e émergente (1-2 cm)
Rough lemon	55	9 feuilles développées, 10 ^e émergente (2-3 cm)
Litchi	86	7-9 feuilles bifoliées développées, 9-11 ^e émergente
Dolichos	18	5 feuilles développées, 6 ^e émergente (2-3 cm)
Faux mimosa	28	5 feuilles développées, 4 ^e émergente (1-2 cm)
Rhodes grass	21	5 feuilles dégainées, 7 ^e émergente
Sesbania	20	5 feuilles développées, 6 ^e mesurant ~ 4 cm
Siratro	28	7 feuilles développées, 8 ^e émergente (2-3 cm)

3. RESULTATS

3.1. Symptômes de toxicité au nickel (Ni)

Ces symptômes sont résumés dans le tableau 3a. On constate les symptômes suivants :

Blé - (Fig. 1). Pas de différences de stade entre le témoin, 10 et 20 μM de Ni. A partir de 20 μM , on constate des chloroses sur les jeunes feuilles, longitudinales entre les nervures, et souvent vers le milieu du limbe.

Courgette - (Fig. 2). A 2,5 μM Ni, le plant est un peu moins développé que le témoin (4^e à 5^e feuille émergente, limbe de la 4^e mesurant 1,5-4,5 cm). A cette dose, on observe des chloroses – finissant par endroit en nécroses – sur les feuilles les plus âgées, internervaires, situées vers les extrémités et peu à la base de la feuille. A 5 et 10 μM , les chloroses et les nécroses sont très étendues, surtout sur les feuilles âgées, sauf au niveau des nervures qui restent vertes. A 10 μM , de nombreux apex foliaires se développent aux points d'insertion des feuilles.

Melon - (Fig. 3). A 2,5 μM Ni, le développement des plants est très retardé (limbe de la 4^e feuille mesurant 1,5-4 cm). Chloroses présentes sur les feuilles les plus âgées, sur tout le limbe mais entre les nervures. Chloroses fortes à 5 et 10 μM Ni.

Squash - (Fig. 4). A 1,25 μM Ni, le développement des plants est légèrement retardé. A 2,5 μM , on observe une chlorose sur les feuilles les plus âgées, internervaires, situées surtout vers les extrémités. A 5 μM , cette chlorose atteint toutes les feuilles, les plus âgées sont nécrosées entre les nervures, des points jaunes apparaissent sur les feuilles cotylédonaires et de nombreux apex foliaires se développent aux points d'insertion des feuilles.

Tomate - (Fig. 5). Les stades de développement sont identiques a 0 - 1,25 et 2,5 μM Ni (6^e feuille 5-10 cm). A 5 μM , le limbe de la 5^e feuille mesure 5-11 cm. On constate à cette dose des tâches chlorotiques évoluant en nécroses sur les feuilles âgées, situées plutôt à la base des folioles. Toutes les folioles d'une feuille sont atteintes.

Bigaradier Gou Tou- (Figs. 6-8). Les plants sont moins développés à 5 μM Ni. Les parties aériennes montrent peu de symptômes, tandis que les racines ont des apex épaissis avec de nombreuses racines latérales groupées au bout de la racine primaire. A 10 et 15 μM Ni, les plants sont très peu développés, les feuilles très chlorosées sur l'ensemble du limbe, et les racines nécrosées au niveau du méristème. La dose de 15 μM est quasiment létale.

Citrange Troyer - (Figs. 6-8). Les plants sont au même stade de développement à 0 et 5 μM Ni. Des chloroses apparaissent sur les feuilles à partir de 10 μM Ni. La dose 20 μM est létale.

Citrus volkameriana - (Figs. 6-8). Les plants sont quasiment au même stade de développement à 0 et 5 μM Ni. Des chloroses apparaissent sur les feuilles à partir de 10 μM .

Lime Rangpur - (Figs. 6-8). Les plants sont quasiment au même stade de développement à 0 et 5 μM Ni, mais de légères chloroses apparaissent à cette dose sur les feuilles situées vers le milieu de la tige. A 10 μM , des apex foliaires se développent aux points d'insertion des feuilles (ramifications), et les feuilles sont très chlorosées.

Poncirus trifoliata - (Figs. 6-8). Les plants sont au même stade de développement à 0 et 5 μM Ni. Des chloroses apparaissent à partir de 5 μM Ni sur les feuilles les plus jeunes.

Rough lemon – (Figs. 6-8). Les plants sont au même stade de développement à 0 et 5 μM Ni. Par contre, à 10 μM Ni, les plants sont très peu développés, les feuilles chlorosées sur l'ensemble du limbe, et il y a de nombreuses racines latérales très courtes et groupées au bout de la racine primaire avec des apex très épaissis, sans être nécrosés.

Litchi - (Fig. 9). Pas de différences de développement entre 0 - 2,5 et 5 μM Ni (nombre de feuilles bifoliées = $7-9 \pm 2$). Une coloration brun-orangée, évoluant en nécrose, apparaît à partir de 5 μM Ni sur les bords des feuilles les plus âgées. Des chloroses apparaissent également sur les jeunes feuilles à partir de 10 μM de Ni (nombre de feuilles = 6 ± 1). A 20 μM , les apex foliaires sont nécrosés, la dose est probablement létale (nombre de feuilles = 2). A 5 et 10 μM , de nombreux rejets se développent aux points d'insertion des feuilles sur la tige principale.

Dolichos – (Fig. 10). Les jeunes feuilles sont progressivement et uniformément chlorosées dès 5 μM .

Faux mimosa – (Fig. 10). Une légère chlorose apparaît sur les jeunes feuilles dès 5 μM , et un épaississement du tissu cortical apparaît au niveau du collet avec de nombreuses racines latérales.

Rhodes – (Fig. 10). Des chloroses internervaires apparaissent sur les jeunes feuilles à partir de 20 μM .

Sesbania – (Fig. 10). Les jeunes feuilles sont chlorosées à partir de 10 μM .

Siratro – (Fig. 10). Les jeunes feuilles sont très faiblement chlorosées, à partir de 5 μM Ni.

3.2. Symptômes de toxicité au manganèse (Mn)

Les symptômes sont résumés dans le tableau 3b.

Citrange Troyer - (Fig. 11). A 125 μM de manganèse, le développement des plants est légèrement retardé, mais sans montrer de symptômes. A 250 μM Mn, les parties aériennes sont très petites, on observe de tâches ("spots") chlorotiques de 1-2 mm de diamètre, souvent au centre des feuilles, avec parfois une nécrose au centre de la tâche. Les racines sont longues et sans symptômes hormis peu de racines latérales. A 500 μM Mn, les parties aériennes sont encore plus petites, les apex foliaires parfois nécrosés, les feuilles très chlorosées ; les racines sont encore longues, sans nécroses, mais avec peu de latérales. A 1000 μM Mn, les parties aériennes sont quasiment au même stade qu'à 500 μM , tandis que les racines sont maintenant petites, mais toujours sans nécroses au niveau des apex, et sans racines latérales.

Tableau 3a. Sévérité des symptômes visuels¹ de toxicité du nickel sur les feuilles.

Plante	Concentration en Ni dans la solution (µM)							
	0	1,25	2,5	5	10	15	20	40
Blé	-	-	-	-	-	-	+	++
Courgette	-		++	+++	++++			
Melon	-		++	+++	++++			
Squash	-	+	++	++++				
Tomate	-	-	-	++				
Bigaradier Gou Tou	-	-	-	+	+++	++++		
Citrange Troyer	-	-	-	-	++	+++		
Volkameriana	-	-	-	-	+	+++		
Lime Rangpur	-	-	-	+	++	+++		
Poncirus	-	-	-	+	++	+++		
Rough lemon	-	-	-	-	++	+++		
Litchi	-	-	-	++	+++	++++		
Dolichos	-			+	+++		++++	
Faux mimosa	-			+	++		+++	
Rhodes grass	-	-	-	-	-		++	+++
Sesbania	-			-	+		+++	
Siratro	-			+	++		+++	

Tableau 3b. Sévérité des symptômes visuels¹ de toxicité du manganèse sur les feuilles.

Plante	Concentration en Mn dans la solution (µM)				
	0	125	250	500	1000
Citrange Troyer	-	-	++	+++	++++

¹ signification des symptômes (% de feuilles atteintes par les symptômes de toxicité) :

- : aucun ; + : 0 à 10 ; ++ : 10 à 30 ; +++ : 30 à 60 ; ++++ : > 60.

3.3. Croissance

La figure 12 regroupe les effets du nickel sur la croissance de toutes les espèces.

3.3.1. Effets du nickel sur les espèces maraîchères

Le poids de matière sèche du blé diminue progressivement pour des concentrations en nickel supérieures à 10 μM (Fig. 13). La tomate, la courgette et le squash ont une croissance modérément diminuée à 1,25 μM , puis fortement diminuée au-delà de 2,5 μM Ni. Pour le melon, la croissance diminue très fortement dès 2,5 μM de Ni.

3.3.2. Effets du nickel sur les espèces fruitières

Le poids de matière sèche du Citrange Troyer diminue à partir de 10 μM de nickel (Fig. 14). Pour le Rough lemon, *Citrus volkameriana*, *Poncirus trifoliata* et Lime Rangpur, 5 μM de Ni a un effet très faible, tandis que leur croissance chute fortement à très fortement à 10 μM . Le bigaradier Gou Tou a un poids de matière sèche fortement diminuée (-50 %) dès 5 μM Ni.

La croissance du Litchi (Fig. 15) n'est pas influencée par le nickel jusqu'à 5 μM , hormis un effet peut-être bénéfique sur les parties aériennes mais qui n'est pas significatif. Par contre sa croissance diminue fortement à partir de 10 μM .

3.3.3. Effets du nickel sur les espèces fourragères

Le poids de matière sèche du Rhodes diminue fortement à 20 μM de Ni (Fig. 16). Le *Sesbania* a une croissance qui diminue progressivement à partir de 5 μM . Le *Leucaena* et le *Dolichos* ont des poids de matière sèche qui diminuent plus fortement dès 5 μM . La croissance du Siratro est extrêmement diminuée dès 5 μM de Ni.

3.3.4. Effets du manganèse sur la croissance

Le manganèse diminue significativement les poids de matière sèche du Citrange Troyer à 125 μM de Mn (-25 %) et fortement au-delà (Fig. 17).

3.4. Teneurs en nickel dans la plante

Pour des raisons de délai à respecter pour les analyses, tous les résultats ne sont pas disponibles au moment de la rédaction de ce document.

Les teneurs en Ni dans les parties aériennes de chaque espèce augmente avec la concentration en Ni dans la solution nutritive (Fig. 18). Les teneurs des espèces suivantes sont fortes : courgette et surtout melon. Les teneurs chez la tomate et les agrumes sont intermédiaires, avec des variations fortes au sein des agrumes (teneurs plus importantes pour Lime rangpur). Chez le blé les teneurs sont beaucoup plus faibles.

Les teneurs en Ni dans les racines augmentent pour toutes les espèces (Fig. 18). Elles sont particulièrement fortes pour le blé. Elles sont fortes également pour le melon. Elles sont plus faibles pour la tomate, la courgette, et surtout les agrumes.

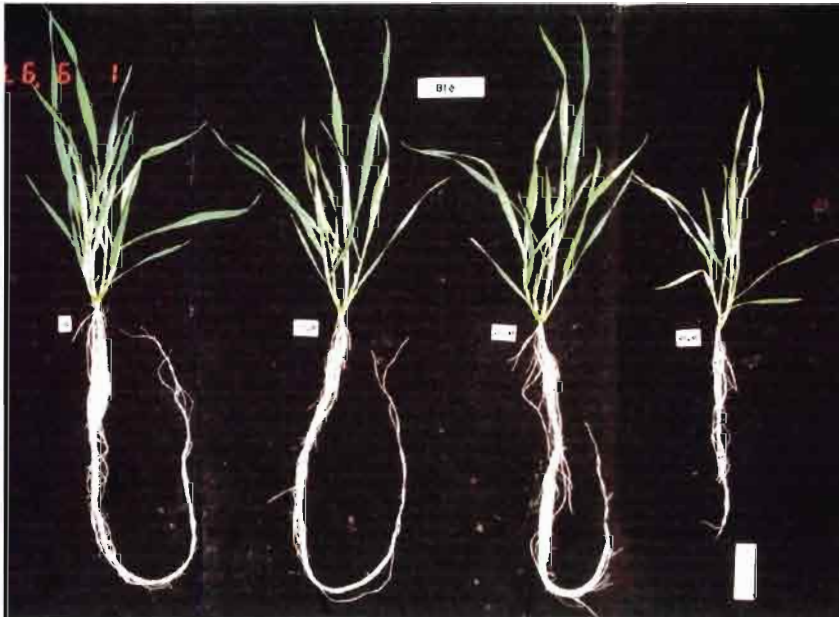


Fig. 1. Effets du nickel sur le blé. Plants cultivés pendant 18 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 10 - 20 - 40 μM).
Noter les chloroses à 20 μM et surtout à 40 μM , et la baisse de croissance à 40 μM .



Fig. 2. Effets du nickel sur la courgette. Plants cultivés pendant 14 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 2,5 - 5 - 10 μM).
 Noter les chloroses foliaires et la baisse de croissance dès 2,5 μM .

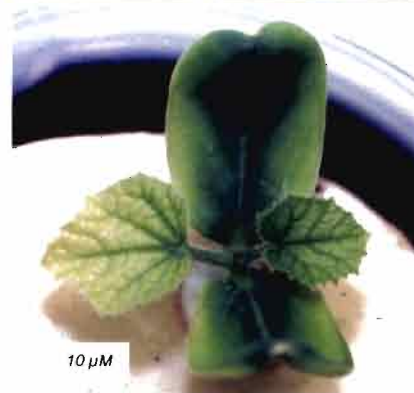
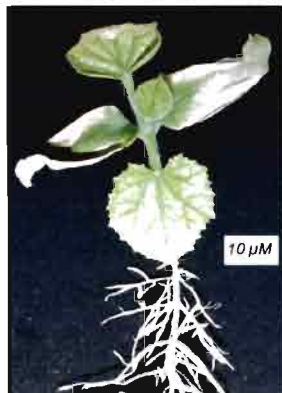
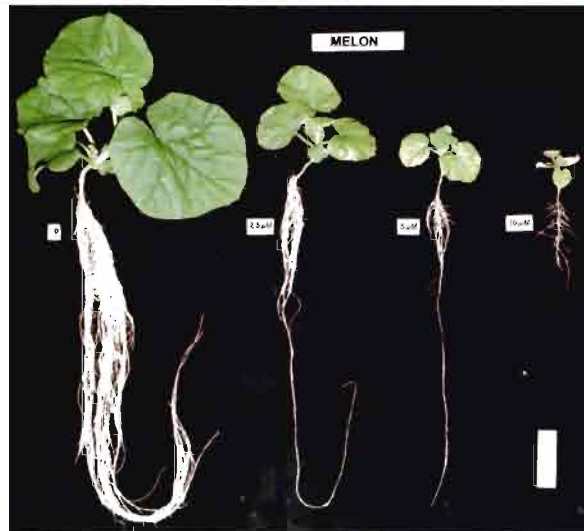


Fig. 3. Effets du nickel sur le melon. Plants cultivés pendant 18 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 2,5 - 5 - 10 μM).
 Noter les chloroses foliaires et la baisse de croissance dès 2,5 μM .

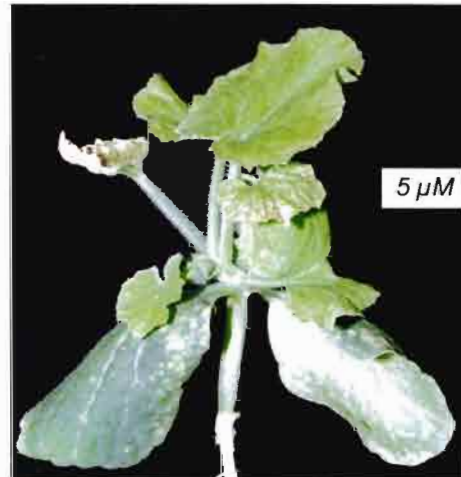


Fig. 4. Effets du nickel sur le squash. Plants cultivés pendant 14 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 1,25 - 2,5 - 5 μ M).
Noter les chloroses foliaires à 2,5 μ M et la légère baisse de croissance à partir de 1,25 μ M.

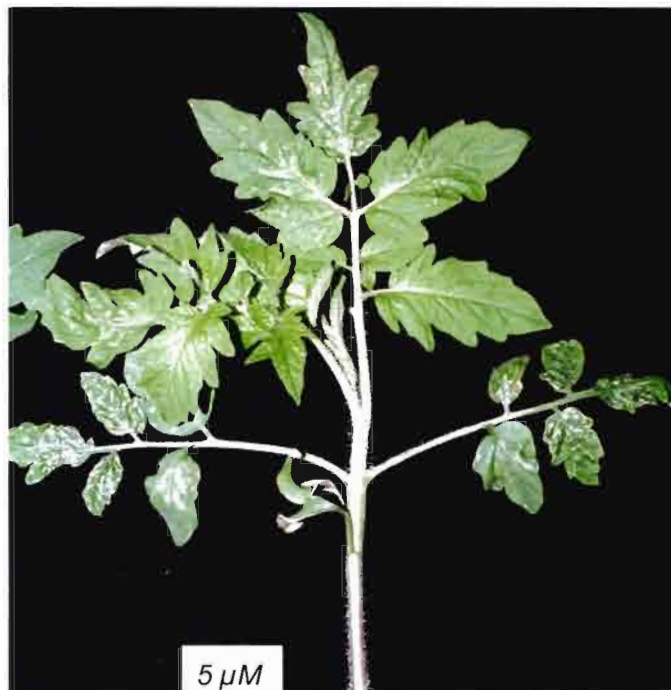


Fig. 5. Effets du nickel sur la tomate. Plants cultivés pendant 19 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 1,25 - 2,5 - 5 µM).
Noter la baisse de croissance et les chloroses foliaires à 5 µM.



Fig. 6. Effets du nickel sur les agrumes (de gauche à droite et de haut en bas : Citrange Troyer, *Citrus volkameriana*, *Ponorus trifoliata*, Lime Rangpur, Bigaradier Gou Tou). Plants cultivés pendant 48 à 55 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 5 - 10 - 15 μM).



Fig. 7. Effets du nickel sur les agrumes (suite).
 Noter la forte baisse de croissance de Bigaradier dès 5 μM de Ni,
 ainsi que la chute de croissance de Rough lemon entre 5 et 10 μM Ni.
 Noter également le faible effet de 10 μM de Ni sur Citrus volkameriana.

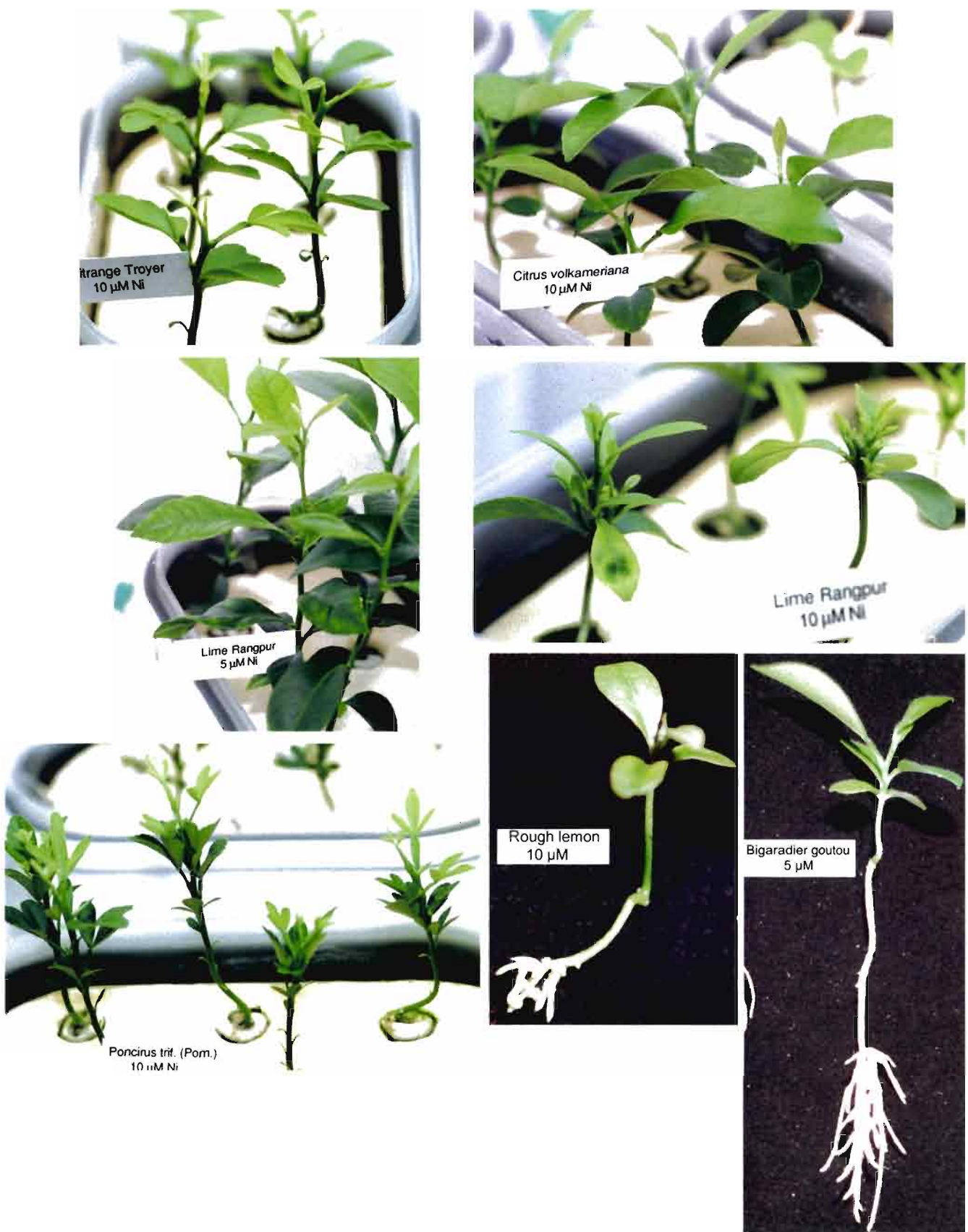


Fig. 8. Effets du nickel sur les agrumes (suite).

Noter les légères chloroses à partir de 5 μM de Ni sur les feuilles de Lime Rangpur.

Noter également les ramifications aux points d'insertion des feuilles de Lime Rangpur à

10 μM Ni, et les racines particulières de Rough Lemon à 10 μM et de Bigaradier à 5 μM

(nombreuses racines latérales groupées au bout de la racine primaire avec des apex épais).



Fig. 9. Effets du nickel sur le Litchi. Plants cultivés pendant 86 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (0 - 2,5 - 5 - 10 - 20 μ M).
 Noter la baisse de croissance à partir de 10 μ M, et les symptômes foliaires particuliers à partir de 5 μ M de Ni.



Fig. 10. Effets du nickel sur les plantes fourragères. Plantes cultivées pendant 18 à 28 j. sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni (marquées sur les figures).

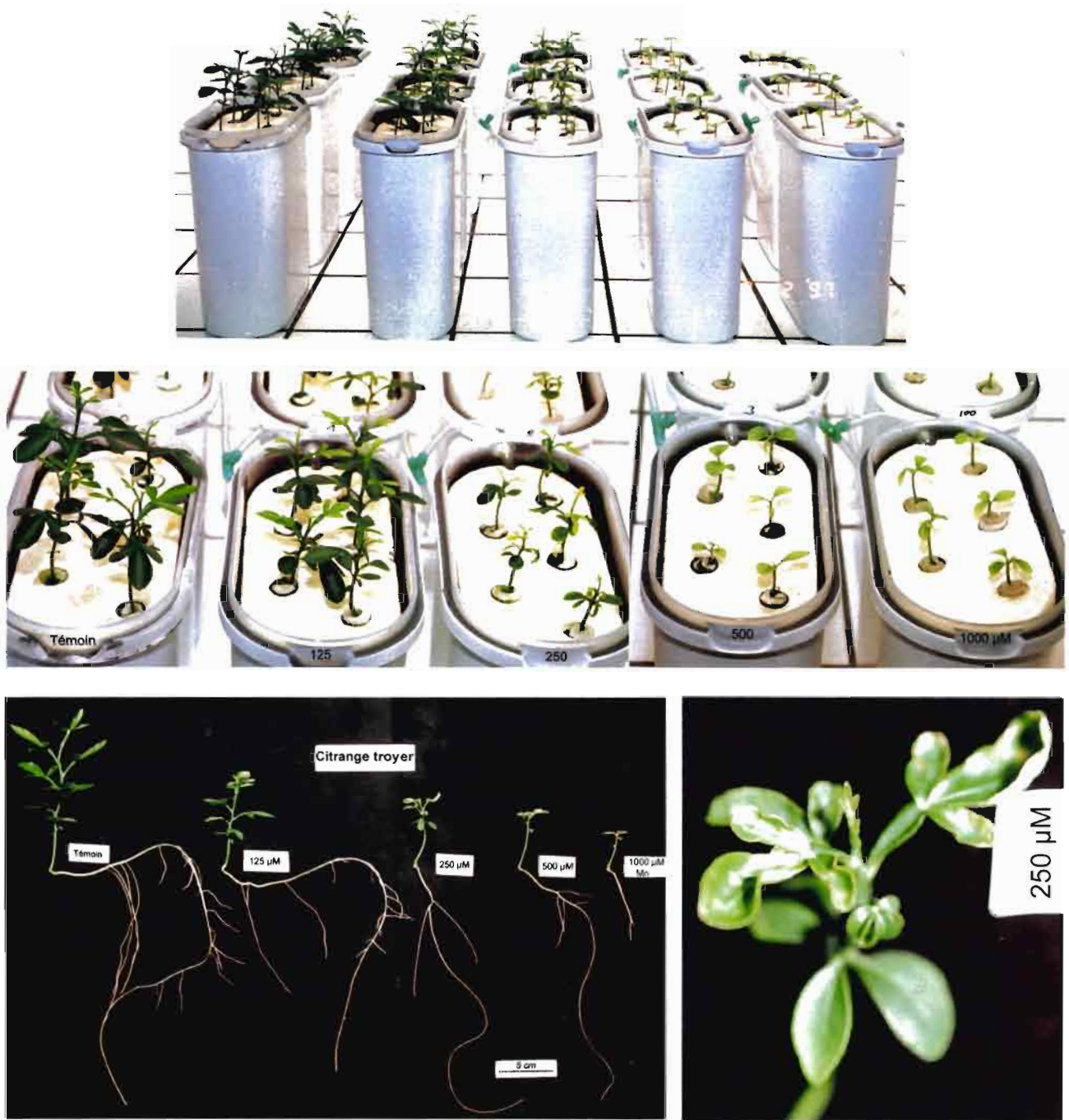


Fig. 11. Effets du manganèse sur le Citrange Troyer. Plants cultivés pendant 55 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Mn (0, 125, 250, 500, 1000 μM). Noter la baisse de croissance à partir de 125 μM , et les tâches chlorotiques sur les feuilles à partir de 250 μM .

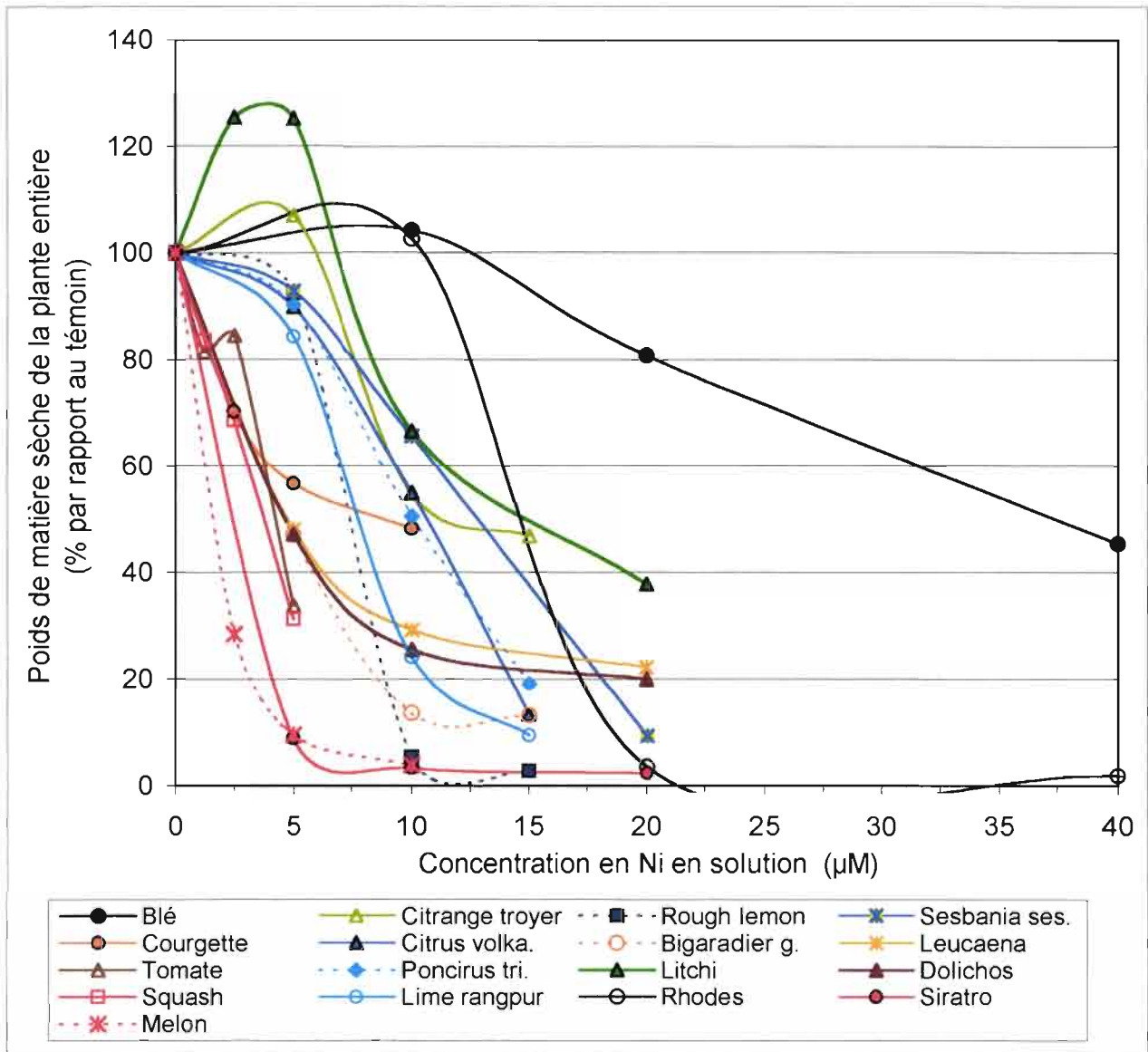


Fig. 12. Effets du nickel sur le poids de matière sèche de tous les plants testés (PMS en g/plt divisé par le poids du témoin, x 100). Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

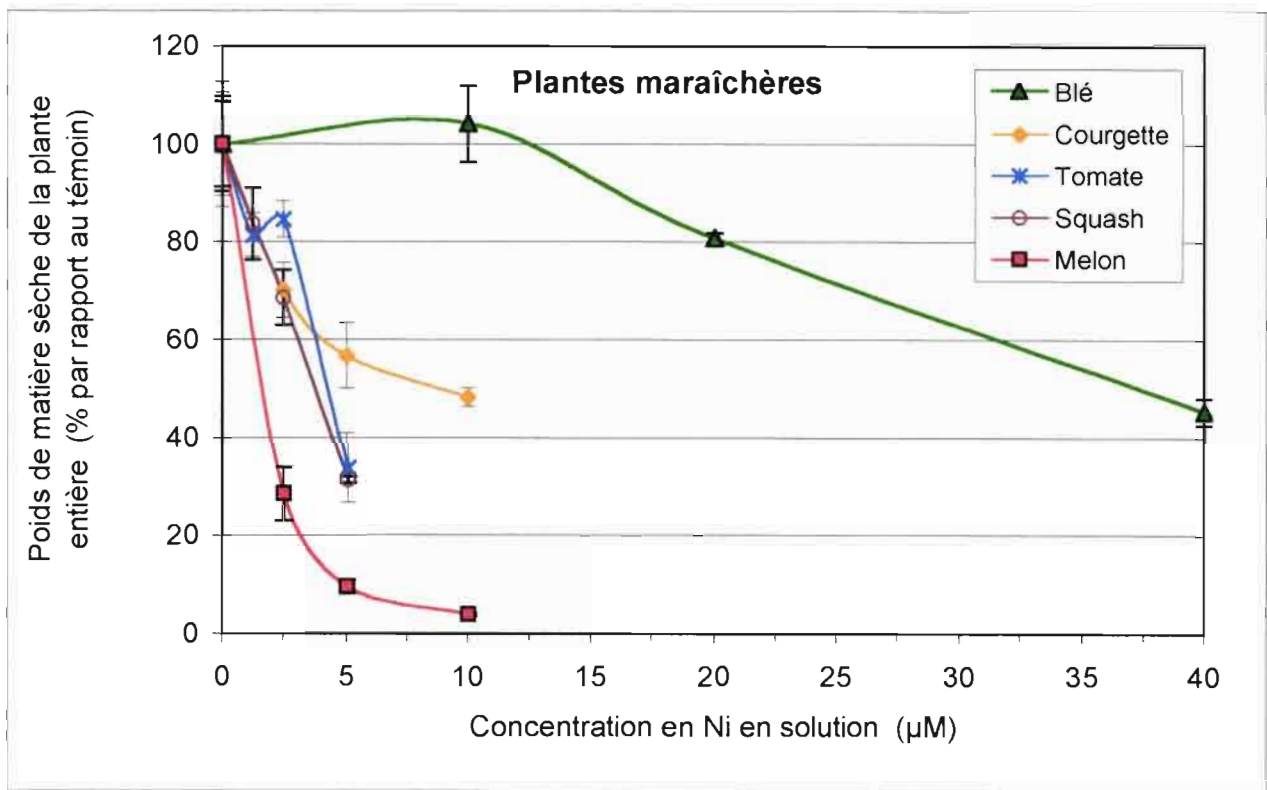


Fig. 13. Effets du nickel sur les poids de matière sèche des plantes maraichères. Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

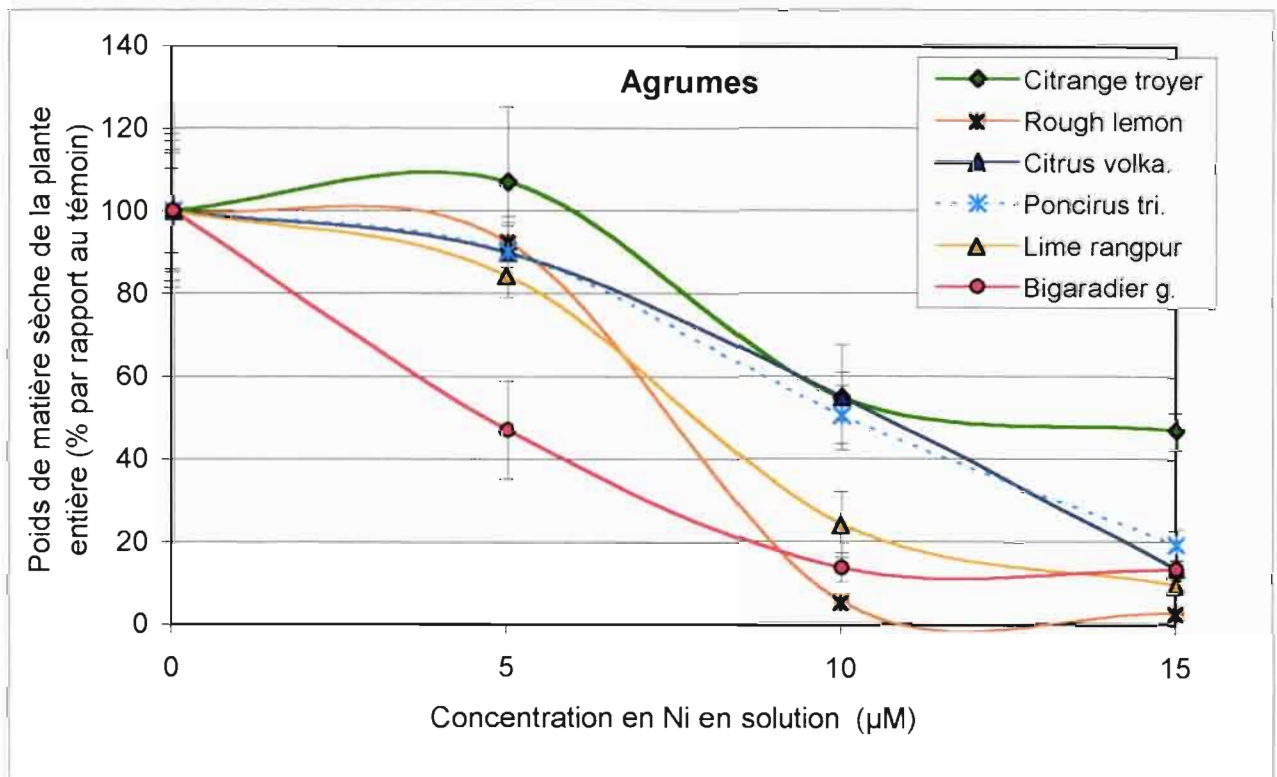


Fig. 14. Effets du nickel sur les poids de matière sèche des agrumes. Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

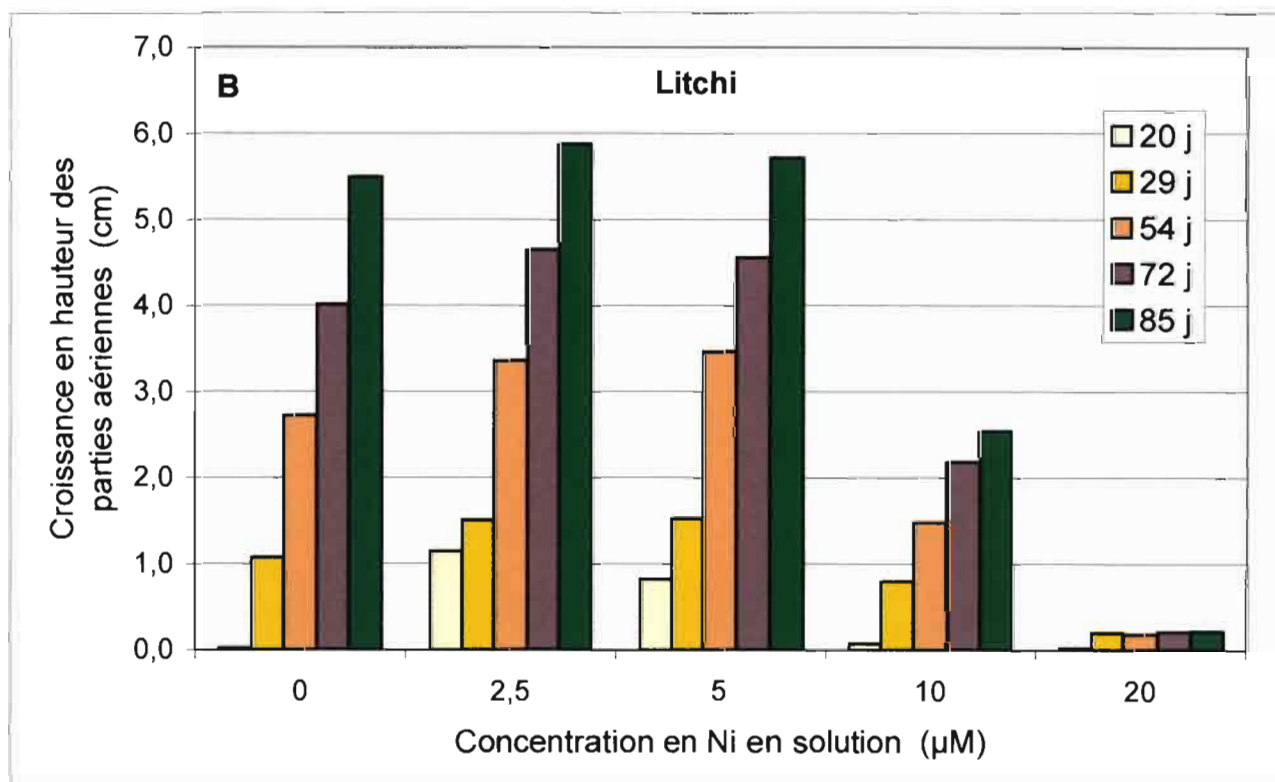
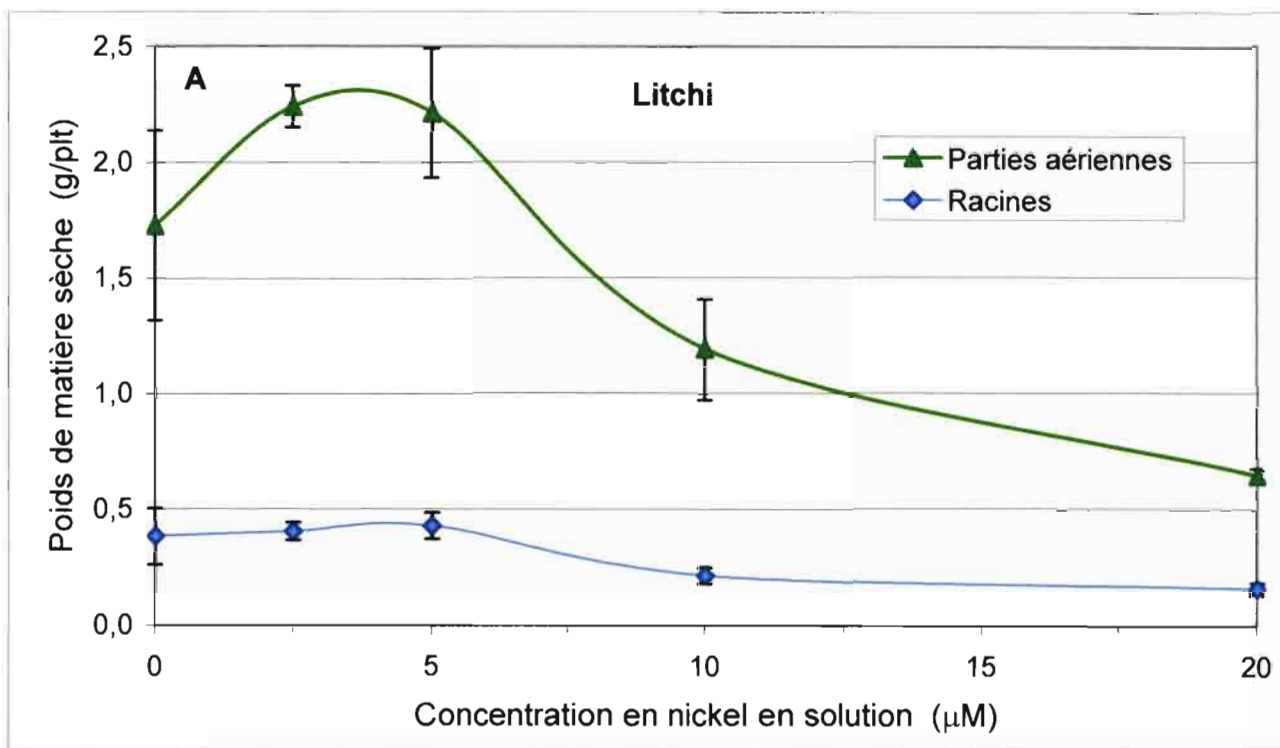


Fig. 15. Effets du nickel sur les poids de matière sèche (A) et la croissance (B) du Litchi. Les plants ont été cultivés pendant 86 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

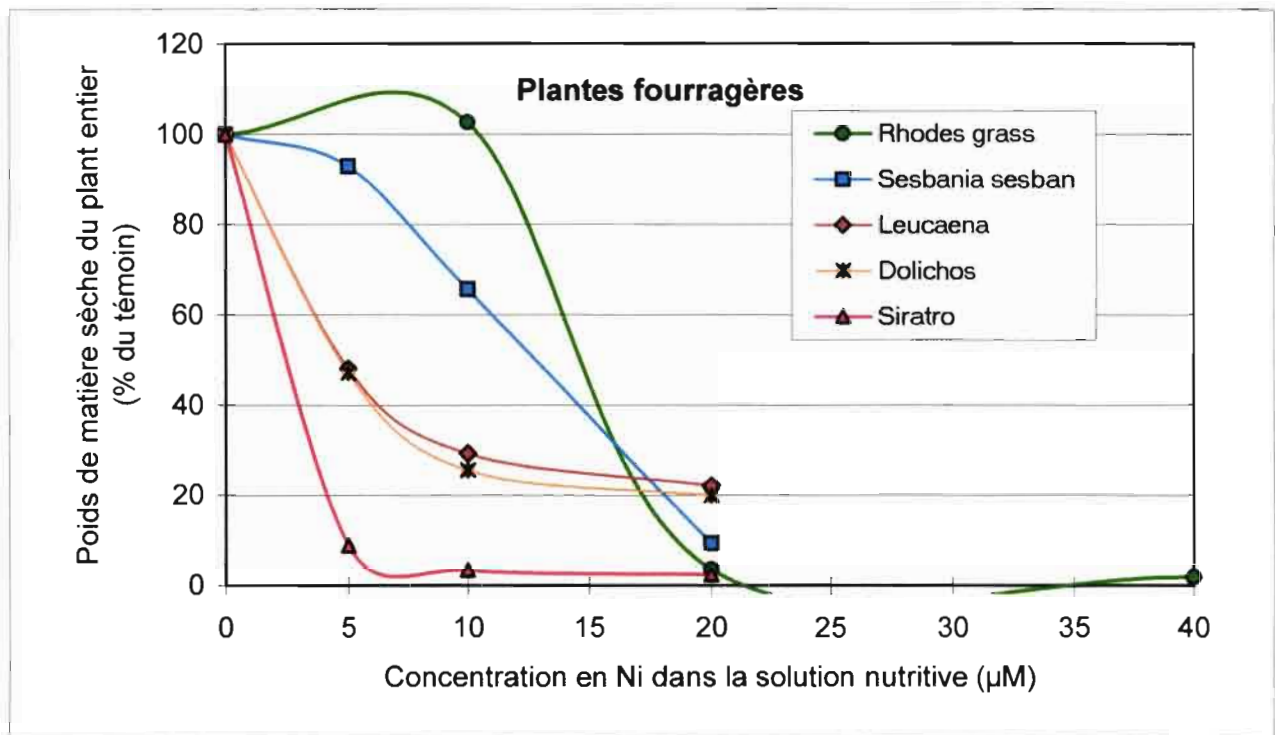


Fig. 16. Effets du nickel sur les poids de matière sèche des espèces fourragères. Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

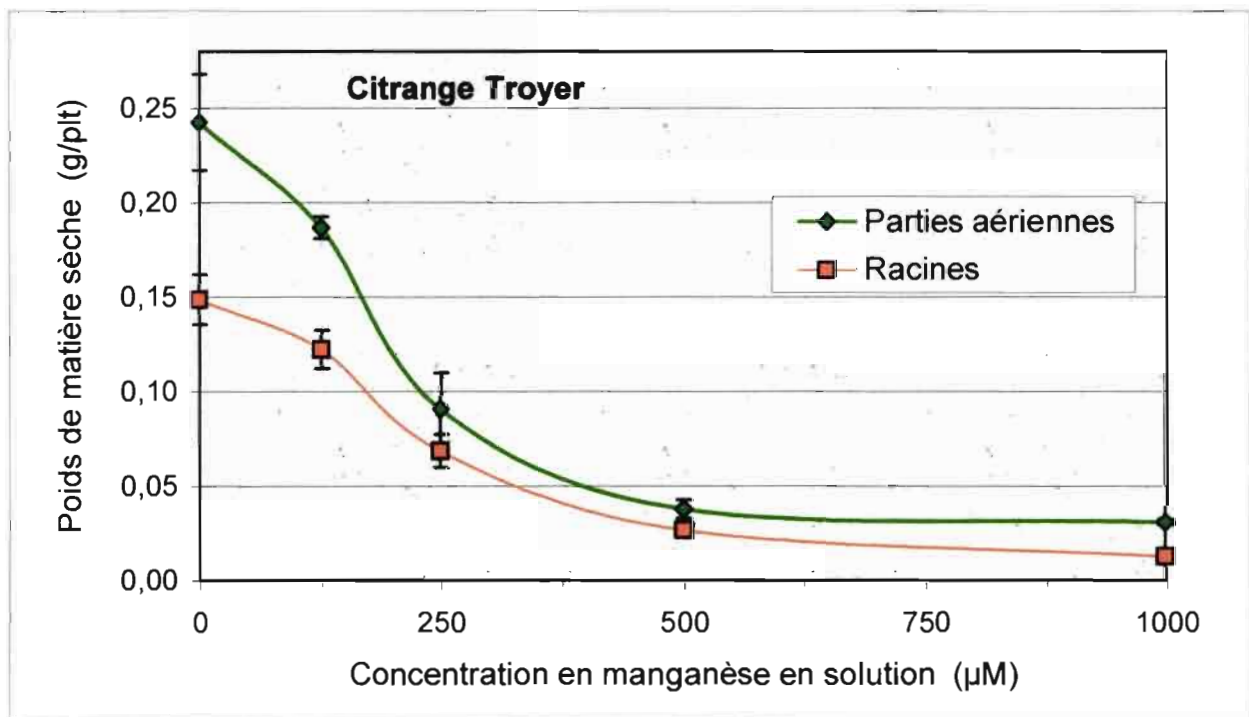


Fig. 17. Effets du manganèse sur les poids de matière sèche du Citrange Troyer. Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Mn.

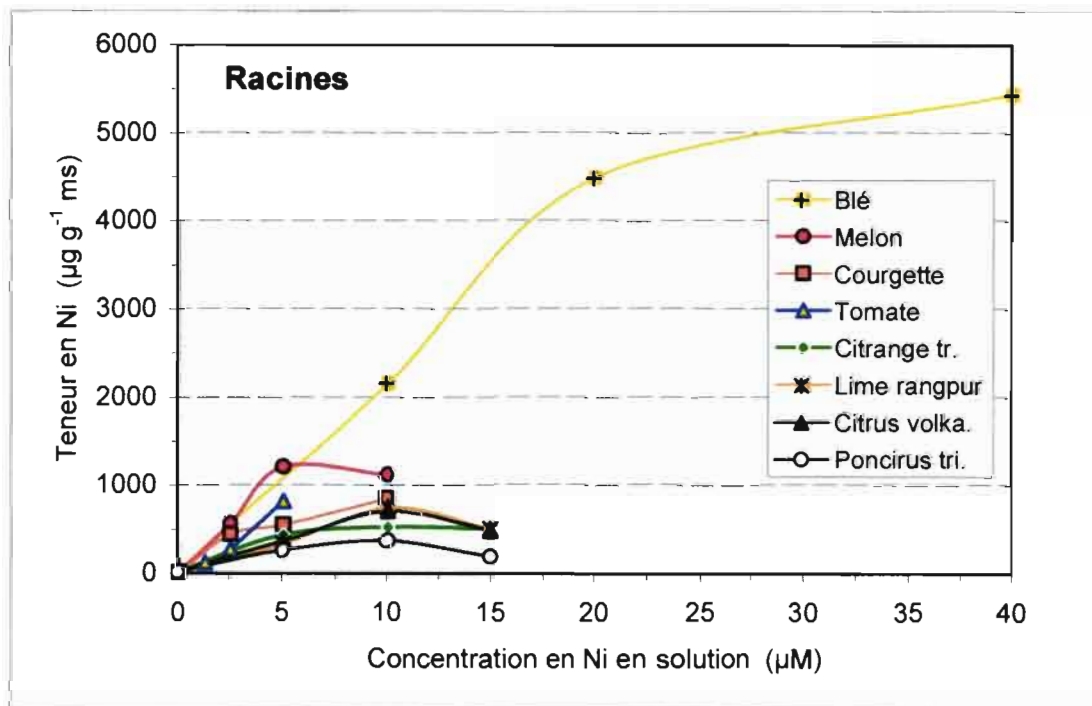
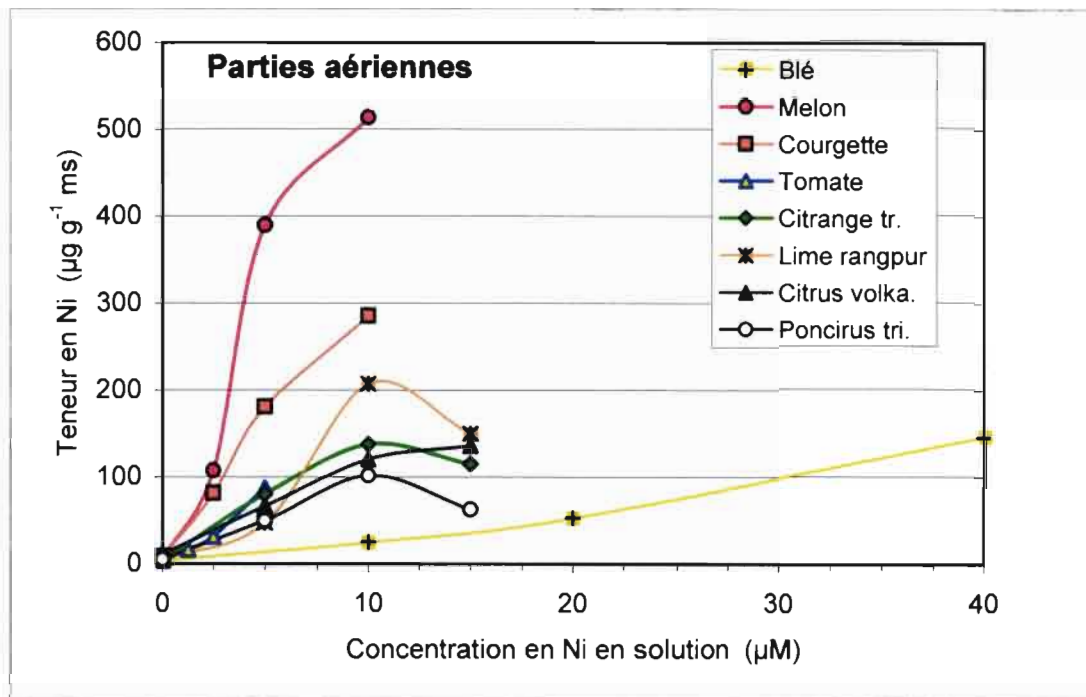


Fig. 18. Teneurs en nickel dans les parties aériennes et les racines.

Les plants ont été cultivés sur solution nutritive contenant différentes concentrations en Ni.

4. DISCUSSION

L'observation des effets toxiques du nickel sur les plantes a montré, d'une manière générale, qu'il n'y a pas de symptômes avant diminution de la croissance, ni de symptômes spécifiques, ce qui exclu tout diagnostic visuel précoce. Il n'y a que le litchi qui manifeste une chlorose foliaire – peut-être spécifique – sans montrer de ralentissement de croissance à 5 μM de Ni (cf. 3.1).

La phytotoxicité du nickel est généralement associée à des chloroses foliaires, voire des nécroses. Pour les monocotylédones testées (blé et rhodes) on observe des chloroses internervaires en bandes longitudinales, surtout sur les jeunes feuilles. Pour les dicotylédones, on constate des chloroses en tâches généralement diffuses entre les nervures, le plus souvent sur les feuilles les plus âgées. Ces observations sont en accord avec les résultats précédents (L'Huillier, 1997) et ceux d'autres auteurs (Hunter et Vergnano, 1952 ; Mishra et Kar, 1974 ; Vanselow, 1966).

S'agissant du manganèse (sur Citrange Troyer), il n'y a pas non plus de symptômes de toxicité avant et même au début de la diminution de la croissance (à 125 μM de Mn). Il n'y a donc pas de diagnostic précoce possible. D'après la littérature, les symptômes de toxicité de Mn décrits ici sont relativement généraux (spots chlorotiques, voire nécrotiques, jaunes à bruns à partir de 250 μM de Mn).

Des différences de croissance importantes ont été constatées entre les plantes cultivées exposées au nickel (Figs. 1 à 16). Il apparaît clairement l'ordre de sensibilité suivant :

- (1) plantes très sensibles montrant une forte diminution de croissance dès 2,5 μM de Ni dans la solution : melon, Siratro ;
- (2) plantes sensibles montrant une diminution de croissance modérée à assez forte à 2,5 μM , et forte à partir de 5 μM de Ni : tomate, courgette, squash, Bigaradier Gou Tou , *Leucaena* et *Dolichos* ;
- (3) plantes moyennement sensibles, pas ou peu influencée à 5 μM , montrant une forte diminution de croissance à partir de 10 μM Ni : Citrange Troyer, Rough lemon, *Citrus volkameriana*, *Poncirus trifoliata*, Lime rangpur, Litchi, *Sesbania sesban* ;
- (4) plantes tolérantes montrant une diminution de croissance à partir de 20 μM de Ni : Rhodes et surtout blé.¹

Ces résultats confirment à nouveau le fait que les monocotylédones sont plus tolérantes que les dicotylédones cultivées (L'Huillier, 1994 ; L'Huillier, 1997 ; Hunter et Vergnano, 1952 ; Sauerbeck and Hein, 1991 ; Yang *et al.*, 1996). Par ailleurs, les résultats sont dans leur ensemble en accord avec ceux d'autres auteurs (cf. chap. 1 dans L'Huillier, 1994).

S'agissant du manganèse, son seuil de toxicité sur l'agrume Citrange Troyer est située vers 100 μM de Mn en solution (Fig. 17). Comparée à la littérature, Citrange Troyer pourrait être

¹ Nous ne tenons pas compte ici de la tolérance exceptionnelle au nickel des plantes endémiques, telle *Sebertia acuminata* capable de tolérer jusqu'à 1000 μM de Ni en solution dans les mêmes conditions de culture qu'ici (résultats personnels). Ces plantes pourraient être qualifiées "d'hypertolérantes".

une espèce assez peu tolérante au manganèse, mais la comparaison est délicate dans la mesure où les conditions de culture sont souvent différentes (en particulier la composition de la solution nutritive). On trouve dans la littérature un seuil de 200 μM de Mn pour l'arachide et 1000 μM pour le maïs (Bénac, 1976), 500 μM de Mn pour le Pétunia (Lee *et al.*, 1992). Comparativement, Mn est beaucoup moins toxique que Ni, puisque le Citrange Troyer est fortement intoxiqué à 10 μM de Ni tandis que 125 μM de Mn est modérément toxique.

Les travaux de Becquer *et al.* (1997) ont montré que les solutions de sol récoltées sur sols ferrallitiques ferritiques (site de Ouénarou, zone de glacis) ont des concentrations en Ni variant de 0 à 9 μM . Ces résultats sont à comparer à ceux de cette étude, en particulier aux concentrations de 2,5 et 5 μM de Ni toxiques pour plusieurs plantes (voir ci-dessus). De plus, les solutions prélevées sur ces sols sont relativement pauvres en nutriments, ce qui augmente encore l'activité toxique du nickel (schématiquement, lorsqu'une solution est pauvre en nutriments, le nickel a une toxicité plus grande, tandis qu'une solution riche en nutriments masque en partie la toxicité de Ni, en particulier grâce aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ; L'Huillier, 1994).

Il est alors certain que les plantes les plus sensibles sont intoxiquées dans les zones de sols ferrallitiques où Ni est le plus disponible, c'est à dire en plaine et en zone colluvio-alluviale, en particulier sur les horizons de surface et sous conditions hydromorphes (Becquer *et al.*, 1997; L'Huillier et Edighoffer, 1996). Les travaux de S. Dupont confirment que les teneurs en Ni sont très élevées chez certains végétaux et atteignent des niveaux toxiques (Dupont et Bonzon, 1997). Les risques de toxicité pour ces plantes sont vraisemblablement très élevés sur tous les sols du Territoire dérivés de roches ultrabasiques (travaux en cours).

S'agissant du manganèse, sa concentration dans les solutions de sol ferrallitique ferritique semblent relativement faibles et insuffisantes pour engendrer une phytotoxicité : moins de 4 μM dans les solutions de sol du site de Ouénarou en zone de glacis (Becquer, résultats non publiés), et moins de 30 μM sur sol ferrallitique ferritique de piedmont (L'Huillier, résultats non publiés). Toutefois, il convient d'être prudent dans la mesure où Mn peut être en faible concentration dans la solution du sol mais présent sur la phase solide du sol sous des formes fortement assimilables par la plante. Des risques de toxicité ne sont donc pas à écarter, surtout lorsque le pH est très acide, et en particulier avec les espèces sensibles, une grande variabilité existant dans ce domaine (Morris and Pierre, 1949 ; Bénac, 1976).

Les teneurs en Ni dans les différents végétaux cultivés varient également fortement suivant l'espèce (Fig. 18). On constate globalement que les espèces les plus sensibles ont de fortes teneurs en Ni dans leurs parties aériennes (en particulier melon, puis courgette), alors que les espèces les plus résistantes ont de faibles teneurs dans les feuilles (blé), ce qui est tout à fait en accord avec les résultats obtenus précédemment (L'Huillier, 1997) et avec Yang *et al.* (1996). D'une manière générale, les espèces transportant fortement Ni vers les feuilles paraissent donc être des espèces sensibles. Une explication physiologique pourrait être une action privilégiée du nickel au niveau de processus métaboliques présents dans les feuilles et pas dans les racines (telle que la photosynthèse).

Il est remarquable de constater que le blé accumule fortement Ni dans ses racines et le transporte très peu dans ses parties aériennes, comparativement aux autres espèces testées. Le blé semble donc résister au nickel par un blocage au niveau racinaire (Fig. 18).

S'agissant des agrumes, le seuil de toxicité de 50 ppm de Ni dans les feuilles déterminé par Vanselow (1966) est assez bien retrouvé (sauf pour Citrange Troyer où le seuil = 80 ppm ; Cf. Tableau 4).

La tolérance au nickel est donc bien corrélée avec une faible teneur en Ni dans les feuilles. Ainsi, la sélection de plantes transportant faiblement Ni vers les parties aériennes peut être une voie intéressante pour diminuer les effets toxiques du nickel sur les végétaux. Cela permettrait également de diminuer le flux de Ni du sol vers les parties aériennes, donc son entrée dans la chaîne alimentaire, même si l'absorption alimentaire de Ni ne semble pas causer de troubles physiologiques graves chez l'homme (OMS, 1991).

Le tableau 4 suivant fait une synthèse de la tolérance au nickel des plantes cultivées (d'après cette étude et d'après les résultats obtenus depuis 1995). Pour les seuils de toxicité dans les parties aériennes, il est indispensable de tenir compte du stade de développement (cf. tableau 2 et paragraphe 3.1, et rapport précédent n. 35) car il a été montré que la teneur en Ni varie beaucoup au cours du développement de la plante (L'Huilier, 1994).

5. CONCLUSION

Ces expérimentations ont permis de distinguer avec une grande rigueur la sensibilité au nickel de plusieurs espèces cultivées – annuelles et pérennes -, de préciser les seuils d'espèces déjà testées précédemment, et d'initier les travaux sur le manganèse.

Il ressort ainsi que plusieurs espèces, comme le melon, la tomate, la courgette et le squash sont beaucoup plus sensibles à Ni que le blé.

Cela confirme tous les résultats précédents, selon lesquels les monocotylédones sont plus tolérantes au nickel que les dicotylédones. Quelques dernières expérimentations devraient permettre de vérifier ce résultat et compléteront les données sur la tolérance au nickel.

Déterminer la tolérance au manganèse, chrome et cobalt de plusieurs espèces cultivées avec ce système de culture constitueront des objectifs à atteindre à partir de 1998.

Tableau 4. Tolérance au nickel des plantes cultivées^a.

Nom commun	Nom botanique	Seuil en solution ^b ($\mu\text{M Ni}$)	Pente ^c (% par μM)	Seuil dans	Classement ^f	Référence ^e
				les parties aériennes ^d ($\mu\text{g Ni} \cdot \text{g}^{-1} \text{ms}$)		
Aubergine	<i>Solanum melongena</i> L.	~ 3 (0 – 5)	18,0	~ 30 (2 – 59)	MS	2
Bigaradier Gou Tou	<i>Citrus aurantium</i> L.	~ 2,5 (0 – 5)	18,5	—	S	1
Blé	<i>Triticum aestivum</i> L.	10	1,8	25	T	1
Carotte	<i>Daucus carota</i> L.	5	16,8	45	MS	2
Citrange Troyer	<i>Citrus sinensis</i> Osb. x <i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf	5	9,2	80	MS	1
Citrus volkameriana	<i>Citrus volkameriana</i> Pasq.	5	7,0	66	MS	1
Concombre	<i>Cucumis sativus</i> L.	~ 1,5 (0 – 5)	14,7	—	S	2
Courgette	<i>Cucurbita pepo</i> L.	~ 1 (0 - 2,5)	12,0	—	S	1
Dolichos	<i>Dolichos lablab</i> L.	~ 2 (0 – 5)	12,0	~ 20 (0 – 56)	S	1
Haricot	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	5	4,6	40	MS	2
Laitue	<i>Lactuca sativa</i> L.	10	15,2	93	MT	2
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	~ 2 (0 – 5)	12,0	—	S	1
Lime rangpur	<i>Citrus limonia</i> Osb.	~ 4	12,0	48	MS	1
Litchi	<i>Litchi chinensis</i>	5	9,1	—	MS	1
Maïs	<i>Zea mays</i> L.	~ 30 (20 – 40)	1,0	~ 75 (62 – 95)	T	2
Melon	<i>Cucumis melo</i> L.	~ 0,5 (0 - 2,5)	29,0	—	SS	1
Navet	<i>Brassica rapa</i> L.	~ 1,5 (0 – 4)	12,5	~ 30 (2 – 78)	S	2
Pastèque	<i>Citrullus vulgaris</i> S.	~ 1,5 (0 – 5)	14,7	—	S	2

Poivron	<i>Capsicum annuum</i> L.	~ 1,5 (0 – 4)	12,5	~ 20 (3 – 49)	S	2
Poncirus trifoliata	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf.	5	7,9	50	MS	1
Radis	<i>Raphanus sativus</i> L.	~ 1,5 (0 – 4)	12,2	~ 30 (7 – 69)	S	2
Rhodes	<i>Chloris gayana</i> Kunth.	10	9,8	62	T	1
Rough lemon	<i>Citrus jambhiri</i> Lush.	5	17,0	—	MS	1
Sesbania	<i>Sesbania sesban</i>	~ 5	5,0	~ 30 (0 – 57)	MS	1
Siratro	<i>Macroptilium atropurpureum</i>	~ 1 (0 – 5)	23,0	~ 15 (0 – 79)	SS	1
Sorgho	<i>Sorghum vulgare</i>	20	2,7	44	T	2
Squash	<i>Cucurbita maxima</i>	~ 1 (0 - 2,5)	13,8	—	S	1
Tomate	<i>Lycopersicum esculentum</i> M.	~ 2 (0 - 2,5)	13,5	~ 20 (17 - 32)	S	1

^aTolérance basée sur les poids de matière sèche de la plante entière.

Ces données ne sont utilisables que comme un guide des tolérances relatives entre les espèces cultivées. Les tolérances absolues varient, en fonction du climat, des conditions de sol et des pratiques culturales. Consulter les références également pour les noms des cultivars.

^bSolution de Hoagland modifiée diluée quatre fois. Certains seuils sont estimés (marque ~) d'après les courbes de réponse et ils se situent entre les chiffres mis entre parenthèses.

^cLa pente est le pourcentage de baisse de croissance de la plante par augmentation d'une unité de nickel en solution (en μM). Ainsi, plus la pente est forte, plus l'influence de Ni est grande.

^dLe seuil dans les parties aériennes dépend beaucoup de l'âge de la plante.

^eRéférences : 1: Cette étude ; 2: L'Huillier L. 1997. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Évaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées. 1. Premiers résultats sur des espèces maraîchères. Nouméa: ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie Agropédol.* 35 : 33 pp.

^fClassement : SS : très sensible ; S : sensible ; MS : modérément sensible ; MT : modérément tolérant ; T : Tolérant.

RÉFÉRENCES

- Becquer T., Bourdon E. et L'Huillier L. 1997. Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Sud de la Nouvelle-Calédonie. *In* Ecologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères. Eds. T. Jaffré, R.D. Reeves et T. Becquer. Actes de la 2^e Conf. Int. sur l'Ecologie des Milieux Serpentiniques, ORSTOM, Nouméa 31 juillet-5 août 1995.
- Bénac R. 1976. Comportement à l'égard de différentes concentrations du manganèse dans le milieu d'une espèce sensible (*Arachis hypogea* L.) et d'une espèce tolérante (*Zea Mays* L.). Cah. Orstom, sér. Biol., vol. XI, n. 1: 43-51.
- Bingham F.T., Peryea F.J. and Jarrel W.M. 1986. Metal toxicity to agricultural crops. *Metal Ions Biol. Syst.* 20 : 119-156.
- Brown P.H, R.M. Welch and E.E. Cary. 1987. Nickel : A micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiol.* 85: 801-803.
- Dupont S. et Bonzon B. 1997. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. 6 – Premier bilan de quatre années d'enquêtes. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, 37 : 54 p.
- Foy C.D., R.L. Chaney and M.C. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 29: 511-566.
- Hammond P.B. and Foulkes E.C. 1986. Metal ion toxicity in man and animals. *Metal, Ions Biol. Syst.* 200 : 157-200.
- Hunter J.G. and O. Vergnano. 1952. Nickel toxicity in plant. *Ann. Appl. Biol.* 39: 279-284.
- Lee C.W., Pak C., Choi J. and Self J.R. 1992. Induced micronutrient toxicity in *Petunia Hybrida*. *J. of Plant Nutr.* 15: 327-339.
- L'Huillier L. 1992. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets d'une fumure organique sur la croissance et la nutrition minérale du maïs cultivé sur un sol ferrallitique riche en métaux lourds (Ni, Mn, Cr, Co). Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, 15 : 112 p.
- L'Huillier L. 1994. Biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques de Ni sur le développement et la physiologie du maïs. Thèse, Université Montpellier II, 249 pp.
- L'Huillier L. 1997. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Évaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées. 1. Premiers résultats sur des espèces maraîchères. Nouméa: ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie Agropédol.* 35 : 33 pp.
- L'Huillier L. et Edighoffer S. 1996. Extractability of nickel and its concentration in cultivated plants in Ni rich ultramafic soils of New Caledonia. *Plant and Soil* 186 : 255-264.
- Mishra D. and M. Kar. 1974. Nickel in plant growth and metabolism. *The Bot. Review* 40: 395-452.
- Morris H.D. and Pierre W.N. 1949. Minimum concentrations of manganese necessary for injury to various legumes in culture solutions. *Agronomy Journal*, 41: 107-112.
- O.M.S. 1991. Nickel. Environmental Health Criteria 108, Geneva, 383 p.

Piccini D. F. and E. Malavolta. 1992. Effect of nickel on two common bean cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 15: 2343-2350.

Sauerbeck D.R. and A. Hein. 1991. The nickel uptake from different soils and its prediction by chemical extractions. *Water, Air, and Soil Pollution* 57-58: 861-871.

Solomons N.W. 1984. The other trace minerals : manganese, molybdenum, vanadium, nickel, silicon, and arsenic. *Curr. Top. Nutr. Diss.* 12 : 269-295.

Vanselow A. P. 1966. Nickel. *In: Diagnostic criteria for plants and soils*, ed. H.D. Chapman, pp. 302-309. Univ. of California, Citrus Research Center and Agric. Experiment Station., Riverside, CA.

Yang X., Baligar V.C., Martens D.C. and Clark R.B. 1996. Plant tolerance to nickel toxicity : I. Influx, transport, and accumulation of nickel in four species. *J. Plant Nutr.* 19 : 73-85.

ANNEXES

Tableau A1. Solution nutritive de Hoagland modifiée (concentrée 120 fois) *.

Tableau A2. Effets du nickel sur les plantes cultivées.
Récapitulatif des analyses de variance.

Tableau A3. Effets du nickel sur les plantes cultivées ligneuses.
Récapitulatif des analyses de variance.

Tableau A4. Effets du manganèse sur les plantes cultivées.
Récapitulatif des analyses de variance.

Tableau A1. Solution nutritive de Hoagland modifiée (concentrée 120 fois *).

Produit	Qtés * (g/L)															
		N	K	Ca	P	S	Mg	Cl	Na	B	Mn	Zn	Cu	Mo	Fe	
KNO ₃	72,24	10,0	28,0													
Ca(NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	113,3	13,4		19,2												
KCl	0,446		0,2					0,212								
NH ₄ H ₂ PO ₄	27,6	3,4		7,44												
NaOH **	1,35								0,861							
MgSO ₄ , 7H ₂ O	29,52					3,84	2,88									
H ₃ BO ₃	0,186									0,032						
MnSO ₄ , H ₂ O	0,041					0,01					0,013					
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	0,07					0,01						0,016				
CuSO ₄ , 5H ₂ O	0,014					0,00							0,004			
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 4H ₂ O	0,011													0,006		
FeEDTA	***														0,134	
Quantité apportée (g/l)		26,9	28,2	19,2	7,44	3,84	2,88	0,212	0,860	0,032	0,013	0,016	0,004	0,006	0,134	

* 1 litre de solution mère donne 480 litres de solutions filles Hoagland 1/4.

Concrètement, pour un bidon avec **24 litres** de solution fille diluée au quart, pipetter **50 mL** de chacune des solutions mères.

** Permet d'avoir un pH final des solutions filles (1/4) = 5,90 - 6,00.

*** Préparer séparément : 0,658 g FeSO₄, 7H₂O + 0,884 g EDTA-Na₂ dans un peu d'eau (200 ml).

Puis ajouter à la solution d'oligo-éléments (1 litre).

Remarque : Garder les solutions mères au noir et au froid (plusieurs mois de conservation).

Dans ce cas, les sortir du frigo bien avant de les utiliser pour les laisser arriver à la température ambiante

(NO₃ et NH₄H₂PO₄ précipitent au froid et se solubilisent à 20 °C ; de plus le volume pipeté à 20 °C est différent à 0 °C).

Tableau A2. Effets du nickel sur les plantes cultivées. Récapitulatif des analyses de variance.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement				Classement
					1	2	3	4	
Blé									
Poids matière fraîche racines	g/plant	3,13	7,95	1,00	3,99	4,13	3,13	1,27	2=1>3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	4,01	9,29	1,00	4,93	5,05	3,94	2,13	2=1>3>4
Poids matière fraîche plants	g/plant	7,14	8,57	1,00	8,92	9,18	7,06	3,41	2=1>3>4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,18	6,73	1,00	0,22	0,24	0,18	0,08	2=1>3>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,44	9,28	1,00	0,53	0,54	0,43	0,26	2=1>3>4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,62	8,27	1,00	0,75	0,78	0,61	0,34	2=1>3>4
Taux matière sèche racines	%	5,96	3,26	0,99	5,60	5,79	5,80	6,64	1=2=3<4
Taux matière sèche parties aériennes	%	11,10	1,32	1,00	10,73	10,79	10,83	12,06	1=2=3<4
Taille maximale des racines	cm				74,00	67,00	47,00	24,00	
Hauteur des parties aériennes	cm				25,40	26,20	25,50	22,30	
Nombre de talles par plant	Nb/plt				6,80	6,30	5,90	3,50	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	3027,3	12,92	1,00	36,70	2156,2	4483,8	5432,5	1<2<3<4
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	57,10	6,44	1,00	4,20	25,30	52,90	145,90	1<2<3<4
Courgette									
Poids matière fraîche racines	g/plant	3,01	14,48	0,99	4,46	3,49	2,50	1,61	1>2>3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	9,31	14,67	1,00	14,73	10,09	7,02	5,42	1>2>3=4
Poids matière fraîche plants	g/plant	12,33	14,36	1,00	19,18	13,58	9,52	7,03	1>2>3=4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,10	13,47	0,99	0,13	0,10	0,08	0,07	1>2=3=4 ; 2>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,62	13,01	1,00	0,91	0,64	0,51	0,43	1>2=3=4 ; 2>4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,72	13,02	1,00	1,04	0,73	0,59	0,50	1>2=3=4 ; 2>4
Taux matière sèche racines	%	3,40	4,39	1,00	3,02	2,79	3,34	4,45	1=2<3<4
Taux matière sèche parties aériennes	%	6,93	2,82	1,00	6,18	6,31	7,27	7,98	1=2<3<4
Taille maximale des racines	cm				58,70	68,40	55,70	19,20	
Taille première vraie feuille	cm				15,00	12,00	8,50	8,00	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	465,00	29,48	1,00	10,30	443,30	553,60	852,80	1<2=3<4
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	139,40	6,12	1,00	9,30	81,60	181,10	285,40	1<2<3<4

Pour le blé 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 10 – 20 et 40 μM Ni. Pour la courgette 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 2,5 – 5 et 10 μM Ni.

Tableau A2 (suite). Effets du nickel sur les plantes cultivées.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement				Classement
					1	2	3	4	
Melon									
Poids matière fraîche racines	g/plant	2,17	11,44	1,00	6,67	1,34	0,45	0,19	1>2>3=4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	5,06	15,71	1,00	14,57	4,01	1,31	0,36	1>2>3=4
Poids matière fraîche plants	g/plant	7,23	14,31	1,00	21,25	5,35	1,76	0,56	1>2>3=4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,06	13,74	1,00	0,18	0,04	0,01	0,01	1>2>3=4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,36	15,03	1,00	1,00	0,30	0,10	0,04	1>2>3=4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,42	14,77	1,00	1,19	0,34	0,11	0,05	1>2>3=4
Taux matière sèche racines	%	3,29	5,26	1,00	2,77	2,98	3,32	4,10	1=2<3<4
Taux matière sèche parties aériennes	%	8,20	4,65	1,00	6,87	7,43	7,63	10,88	1=2=3<4 ; 1<3
Longueur maximale des racines	cm				67,80	46,10	25,40	9,32	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	727,80	10,07	1,00	18,10	564,60	1209,9	1118,7	1<2<4=3
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	254,60	29,94	1,00	7,40	107,80	389,70	513,50	1<2<3=4
Squash									
Poids matière fraîche racines	g/plant	4,41	13,56	1,00	6,25	5,30	4,00	2,08	1=2>3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	15,64	14,43	1,00	22,55	19,34	15,26	5,40	1=2>3>4
Poids matière fraîche plants	g/plant	20,05	14,16	1,00	28,80	24,64	19,26	7,48	1=2>3>4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,16	14,90	0,99	0,22	0,19	0,16	0,08	1=2=3>4 ; 1>3
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	1,08	13,06	1,00	1,53	1,27	1,04	0,47	1=2=3>4 ; 1>3
Poids matière sèche plants	g/plant	1,24	13,26	0,99	1,75	1,46	1,20	0,55	1=2=3>4 ; 1>3
Taux matière sèche racines	%	3,75	2,64	0,98	3,56	3,65	3,92	3,88	1=2<4=3
Taux matière sèche parties aériennes	%	7,22	3,40	1,00	6,78	6,57	6,84	8,67	1=2=3<4

Pour le melon 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 2,5 – 5 et 10 μM Ni. Pour le squash 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 1,25 – 2,5 et 5 μM Ni.

Tableau A2 (suite). Effets du nickel sur les plantes cultivées.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement				Classement
					1	2	3	4	
Tomate									
Poids matière fraîche racines	g/plant	3,66	17,48	0,99	5,06	4,15	3,93	1,48	1=2=3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	14,21	13,81	0,99	19,42	15,25	15,84	6,34	1=3=2>4 ; 1>2
Poids matière fraîche plants	g/plant	17,87	13,67	0,99	24,48	19,40	19,77	7,82	1=3=2>4 ; 1>2
Poids matière sèche racines	g/plant	0,20	16,96	0,99	0,27	0,22	0,22	0,08	1=2=3>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	1,03	12,96	0,99	1,36	1,11	1,17	0,47	1=3=2>4
Poids matière sèche plants	g/plant	1,23	13,14	0,99	1,64	1,33	1,39	0,55	1=3=2>4
Taux matière sèche racines	%	5,43	4,10	0,49	5,44	5,26	5,55	5,45	
Taux matière sèche parties aériennes	%	7,30	4,65	0,45	7,03	7,27	7,39	7,49	
Longueur des tiges	cm				13,10	11,30	11,60	10,10	
Taille première vraie feuille	cm				21,00	19,40	18,50	8,40	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	306,70	15,88	1,00	4,80	125,30	278,30	818,30	1<2<3<4
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	35,10	13,22	1,00	3,80	16,90	31,90	87,70	1<2<3<4
Sesbania sesban									
Poids matière sèche racines	g/plant	0,09	23,51	0,98	0,15	0,13	0,09	0,01	1=2=3>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,25	17,79	0,99	0,39	0,36	0,26	0,04	1=2>3>4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,34	18,86	0,99	0,54	0,50	0,35	0,05	1=2>3>4

* Pour la tomate 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 1,25 – 2,5 et 5 µM Ni. Pour Sesbania 1 – 2 – 3 et 4 = 0 – 5 – 10 et 20 µM Ni.

Tableau A3. Effets du nickel sur les plantes cultivées ligneuses. Récapitulatif des analyses de variance.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement				Classement
					1	2	3	4	
Citrange Troyer									
Poids matière fraîche racines	g/plant	0,59	12,51	1,00	0,86	0,84	0,40	0,27	1=2>3=4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	0,64	16,79	1,00	0,92	1,00	0,34	0,30	2=1>3=4
Poids matière fraîche plants	g/plant	1,23	14,68	1,00	1,78	1,84	0,74	0,57	2=1>3=4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,16	16,07	0,99	0,21	0,21	0,13	0,10	2=1>3=4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,22	20,10	0,99	0,29	0,31	0,14	0,13	2=1>3=4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,38	18,28	0,99	0,49	0,53	0,27	0,23	2=1>3=4
Taux matière sèche racines	%	29,84	3,94	1,00	23,94	25,33	33,36	36,72	1=2<3<4
Taux matière sèche parties aériennes	%	36,88	2,83	1,00	31,19	31,43	40,11	44,81	1=2<3<4
Longueur maximale des racines	cm				39,00	32,00	16,50	10,00	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	373,70	14,39	1,00	21,40	438,30	527,20	508,00	1<2=3=4
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	84,60	13,10	1,00	4,20	80,80	138,10	115,20	1<2<4<3
Lime Rangpur									
Poids matière fraîche racines	g/plant	0,54	18,95	1,00	0,91	0,80	0,34	0,09	1=2>3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	1,02	22,88	1,00	1,96	1,57	0,42	0,13	1=2>3=4
Poids matière fraîche plants	g/plant	1,56	21,25	1,00	2,87	2,37	0,76	0,22	1=2>3=4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,15	15,47	1,00	0,24	0,22	0,09	0,03	1=2>3>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,35	21,60	1,00	0,67	0,55	0,13	0,06	1=2>3=4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,50	19,77	1,00	0,92	0,77	0,22	0,09	1=2>3=4
Taux matière sèche racines	%	28,41	13,94	0,26	27,06	27,48	28,69	30,40	
Taux matière sèche parties aériennes	%	37,27	8,79	0,98	34,29	35,37	33,99	45,45	1=2=3<4
Longueur maximale des racines	cm				28,50	24,00	15,00	4,00	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	400,20	11,32	1,00	9,20	334,30	749,50	507,90	1<2<4<3
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	102,70	15,03	1,00	5,90	47,60	207,30	149,90	1<2<4<3

1, 2, 3 et 4 = 0, 5, 10 et 15 µM Ni.

Tableau A3 (suite). Effets du nickel sur les plantes cultivées ligneuses.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement				Classement
					1	2	3	4	
<i>Citrus volkameriana</i>									
Poids matière fraîche racines	g/plant	0,64	12,10	1,00	0,95	0,85	0,62	0,12	1=2>3>4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	1,05	13,95	1,00	1,72	1,52	0,81	0,15	1=2>3>4
Poids matière fraîche plants	g/plant	1,68	12,88	1,00	2,67	2,36	1,43	0,27	1=2>3>4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,15	11,91	1,00	0,23	0,20	0,14	0,04	1=2>3>4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,32	16,16	1,00	0,51	0,46	0,26	0,06	1=2>3>4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,47	14,68	1,00	0,73	0,66	0,40	0,10	1=2>3>4
Taux matière sèche racines	%	24,83	4,97	0,99	23,75	23,57	23,08	28,91	1=2=3<4
Taux matière sèche parties aériennes	%	33,62	3,01	1,00	29,48	30,37	32,16	42,47	1=2=3<4 ; 1 <3
Longueur maximale des racines	cm				24,00	22,00	15,00	5,00	
Teneur en Ni dans les racines	ppm	392,60	11,86	1,00	15,20	370,10	705,90	479,40	1<2<4<3
Teneur en Ni dans les parties aériennes	ppm	83,60	18,96	1,00	11,40	66,60	120,40	136,10	1<2<3=4
Bigaradier Gou Tou									
Poids matière fraîche racines	g/plant	0,26	34,97	1,00	0,53	0,37	0,07	0,06	1=2>3=4
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	0,34	35,70	1,00	0,84	0,37	0,08	0,08	1>2>4=3
Poids matière fraîche plants	g/plant	0,60	34,94	1,00	1,37	0,74	0,15	0,14	1>2>3=4
Poids matière sèche racines	g/plant	0,05	27,26	1,00	0,10	0,06	0,02	0,01	1>2>3=4
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,10	37,30	1,00	0,25	0,10	0,03	0,03	1>2>3=4
Poids matière sèche plants	g/plant	0,15	33,07	1,00	0,34	0,16	0,05	0,04	1>2>3=4
Taux matière sèche racines	%	21,46	6,81	1,00	18,52	17,01	24,72	25,60	1=2<3=4
Taux matière sèche parties aériennes	%	32,09	4,10	1,00	29,34	26,44	35,73	36,84	2<1<3=4

1, 2, 3 et 4 = 0, 5, 10 et 15 µM Ni.

Tableau A3 (suite). Effets du nickel sur les plantes cultivées ligneuses.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement					Classement
					1	2	3	4	5	
Litchi										
Poids matière fraîche racines	g/plant	1,56	20,41	1,00	1,98	1,88	2,25	1,15	0,55	3=1=2>4>5
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	4,83	16,87	1,00	5,74	6,73	6,75	3,68	1,27	3=2=1>4>5
Poids matière fraîche plants	g/plant	6,39	13,66	1,00	7,71	8,61	9,00	4,84	1,82	3=2=1>4>5
Poids matière sèche racines	g/plant	0,33	16,66	1,00	0,43	0,40	0,43	0,21	0,16	3=1=2>4=5
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	1,65	13,72	1,00	1,96	2,24	2,21	1,19	0,64	2=3=1>4>5
Poids matière sèche plants	g/plant	1,98	11,61	1,00	2,38	2,64	2,64	1,40	0,80	2=3=1>4>5
Taux matière sèche racines	%	21,91	8,72	0,99	21,84	21,65	19,12	18,59	28,35	5>1=2=3=4
Taux matière sèche parties aériennes	%	36,91	11,17	0,99	34,21	33,48	32,87	32,45	51,52	5>1=2=3=4

1 – 2 – 3 – 4 et 5 = 0 – 2,5 – 5 – 10 et 20 μ M Ni.

Tableau A4. Effets du manganèse sur les plantes cultivées. Récapitulatif des analyses de variance.

Paramètre	Unité	Moyenne générale	Coef. de variation (%)	Probabilité	Moyenne par traitement					Classement
					1	2	3	4	5	
Citrange Troyer										
Poids matière fraîche racines	g/plant	0,39	12,50	1,00	0,64	0,49	0,30	0,14	0,07	1>2>3>4>5
Poids matière fraîches parties aériennes	g/plant	0,46	15,03	1,00	0,84	0,61	0,29	0,12	0,09	1>2>3>4>5
Poids matière fraîche plants	g/plant	0,86	13,29	1,00	1,48	1,10	0,58	0,26	0,16	1>2>3>4>5
Poids matière sèche racines	g/plant	0,09	13,83	1,00	0,15	0,12	0,07	0,03	0,01	1>2>3>4>5
Poids matière sèche parties aériennes	g/plant	0,14	14,72	1,00	0,24	0,19	0,09	0,04	0,03	1>2>3>4=5
Poids matière sèche plants	g/plant	0,23	13,73	1,00	0,39	0,31	0,16	0,06	0,04	1>2>3>4=5
Taux matière sèche racines	%	22,56	3,58	0,99	23,17	24,69	23,23	19,13	18,31	2=3=1>4=5
Taux matière sèche parties aériennes	%	30,97	2,01	0,99	28,84	30,72	31,90	32,41	33,68	5>4=3>2>1

1, 2, 3, 4 et 5 = 0, 125, 250, 500 et 1000 μM Mn.

