

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

Evaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées.

1 - Premiers résultats sur des espèces maraîchères.

Laurent L'HUILLIER

Convention Province Sud / ORSTOM
N°53-PVF / DDR notifiée le 14 janvier 1991.
Avenant 5 du 29/12/1995.

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 35

1997

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

Evaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées.

1 - Premiers résultats sur des espèces maraîchères.

Laurent L'HUILLIER

Convention Province Sud / ORSTOM N°53-PVF / DDR notifiée le 14 janvier 1991.
Avenant 5 du 29/12/1995.



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

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1997

/L'huillier, L.

Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie.
Evaluation de la sensibilité au nickel des espèces cultivées. 1 - Premiers résultats sur
des espèces maraîchères.

Nouméa : ORSTOM. Janvier 1997. 22 p.
Conv. : Sci. Vie; Agropédol. ; 35

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

Imprimé par le Centre ORSTOM
Février 1997

AVANT PROPOS

Ce rapport rend compte des résultats obtenus en 1996, et en partie en 1995, au Laboratoire d'Agropédologie du Centre ORSTOM de Nouméa, au titre de la troisième opération - concernant **la détermination de la sensibilité au nickel des plantes cultivées** - de l'avenant 5 à la convention de recherche Province Sud - ORSTOM sur « **l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre** ».

PLAN

RÉSUMÉ	3
DOCUMENTS ANTERIEURS.....	4
1. INTRODUCTION	5
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	6
<i>2.1 Matériel végétal et conditions de culture</i>	<i>6</i>
<i>2.2 Teneur en Ni dans la plante</i>	<i>8</i>
<i>2.3 Calculs du taux de croissance et de l'influx et du transport de nickel.....</i>	<i>8</i>
3. RÉSULTATS	9
3.1 Symptômes de toxicité au nickel	9
3.2 Croissance	18
3.3 Teneurs en nickel dans la plante.....	18
3.4 Influx et transport de Ni	18
3.5 Test variétal sur maïs	19
4. DISCUSSION.....	28
5. CONCLUSION.....	30
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31
ANNEXES	33

RÉSUMÉ

Les effets toxiques du nickel sur la croissance de plusieurs espèces cultivées ont été étudiés. Quatorze espèces ont été cultivées pendant 10 à 26 jours sur solution nutritive contenant différentes concentrations de nickel.

Des différences de sensibilité importantes ont été mises en évidence. Il apparaît l'ordre suivant : (1) les plantes les plus sensibles : pastèque, tomate, concombre, chou, poivron, radis, navet et squash ; (2) les plantes assez sensibles : carotte et aubergine ; (3) les plantes moyennement sensibles : haricot et laitue ; (4) les plantes les moins sensibles : sorgho et maïs.

Les premiers symptômes de toxicité sont généralement représentés par des chloroses foliaires. Ces symptômes apparaissent en même temps que la diminution de la croissance, et de plus ne sont pas spécifiques, si bien qu'il ne peuvent être utilisés pour un diagnostic précoce.

Les dicotylédones les plus sensibles montrent une diminution très importante de leur croissance dès 5 μM Ni. Des concentrations en Ni équivalentes, voire même supérieures, sont rencontrées dans les solutions de sol ferrallitique ferritique. Les risques de toxicité au champ sont donc bien réels, surtout dans les zones où Ni est le plus disponible.

La résistance au nickel est bien corrélée avec une faible teneur en Ni dans les feuilles et un faible transport. La sélection de plantes transportant faiblement Ni peut donc être une voie intéressante pour diminuer à la fois les effets toxiques du nickel et le flux de Ni du sol vers les parties aériennes.

Mots-clés : nickel, toxicité, plante cultivée, sol ferrallitique ferritique, Nouvelle-Calédonie.

DOCUMENTS ANTERIEURS

L'Huillier L. et Edighoffer S. 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. Nouméa: ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie Agropédol.* **11** : 16 p.

L'Huillier L. et Edighoffer S. 1992. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Etude des effets de doses toxiques de sulfate de nickel sur la croissance, le développement et la nutrition du maïs. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, **13** : 82 p.

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., 1993. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Développement complet du maïs intoxiqué par le nickel. Etudes complémentaires des effets du nickel sur la nutrition et la croissance du maïs. Nouméa : ORSTOM. *Conv. : Sci. Vie : Agropédol.*, **18**, 60 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 de l'Université de Montpellier II, 20 décembre 1994, 249 pp.

L'Huillier L., D'auzac J., Durand M. et Michaud-Ferrière N. 1994. Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques du nickel sur la structure et la physiologie de deux variétés de maïs. Approche d'un mécanisme de phytotoxicité du nickel. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, **25** : 20 p.

Bonzon B., L'Huillier L., Edighoffer S., Bourdon E., Becquer T. et Laubreaux P. 1995. Facteurs de la fertilité et conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre. Historique et résultats des recherches. Questions pour l'avenir. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, **31** : 32 p.

Bonzon B., Edighoffer S., Bourdon E., Becquer T., L'Huillier L. et Laubreaux P. 1996. Evolution en plein champ des arrières-effets de doses croissantes de phosphore. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.* (à paraître).

1. INTRODUCTION

L'importance biologique et le caractère essentiel¹ du nickel pour les organismes vivants a été souvent étudié. 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 au nickel des plantes cultivées, engagés dans le cadre de la Convention Province Sud - ORSTOM pour l'étude de la mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie, ont été motivés par l'extraordinaire richesse en nickel des sols de Nouvelle-Calédonie développés sur roches ultrabasiques, comme les sols ferrallitiques ferritiques de massifs du Sud de la Grande Terre. Parmi les nombreux métaux potentiellement toxiques présents dans ces sols (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 qu'en fonction de la position du sol dans le paysage, la disponibilité du nickel pour les végétaux peut être élevée dans ces sols et atteindre des niveaux toxiques (Becquer *et al.*, 1995; Becquer *et al.*, 1997; L'Huillier et Edighoffer, 1996).

Le grand intérêt accordé à l'absorption du nickel par les végétaux et à son transport dans la plante provient le plus souvent des risques d'entrée excessif dans la chaîne alimentaire. Les risques pour la santé humaine liés à l'absorption alimentaire de nickel semblent toutefois relativement limités (OMS, 1991). Par contre, un intérêt majeur est l'étude du développement de la plante sur sol riche en Ni, et des conditions d'amélioration de ce développement, car la phytotoxicité de Ni est un fait clairement établi.

Les espèces végétales et les cultivars sont connus pour varier fortement dans leur sensibilité au nickel (Bingham *et al.*, 1986 ; Piccini et Malavolta, 1992 ; Sauerbeck et Hein, 1991). Par conséquent, la sélection des plantes relativement tolérantes au nickel peut être une voie très intéressante pour une meilleure exploitation agricole des sols à forte teneur en Ni. Des premiers travaux prometteurs nous ont poussés à approfondir cette voie (L'Huillier, 1994).

Les objectifs de cette étude étaient ainsi de déterminer :

- ➔ la sensibilité au nickel de plusieurs espèces, essentiellement maraîchères,
- ➔ la concentration en Ni dans chaque plante,
- ➔ l'influx de Ni dans les racines,
- ➔ son transport vers les parties aériennes.

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

Les semences ont toutes été achetées chez les principaux providiers de Nouméa, et sont communément utilisées par les producteurs. Les espèces végétales suivantes ont été testées :

Tableau 1. Espèces végétales utilisées pour les expérimentations.

Espèce	Variété	Nom latin	Famille
Aubergine	Beauté noire	<i>Solanum melongena</i> L.	Solanacées
Carotte	Kuroda PS	<i>Daucus carota</i> L.	Ombellifères
Chou	Baraka	<i>Brassica oleracea</i> L.	Crucifères
Concombre	Poinsett	<i>Cucumis sativus</i> L.	Cucurbitacées
Haricot	Contender	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Légumineuses
Laitue	Batavia Minetto nouvelle	<i>Lactuca sativa</i>	Composées
Maïs	Hycorn 83	<i>Zea mays</i> L.	Graminées
Navet	White stone	<i>Brassica rapa</i> L.	Crucifères
Pastèque	Ecarlate sucrée	<i>Citrullus vulgaris</i> S.	Cucurbitacées
Poivron	Yolo wonder	<i>Capsicum annuum</i> L.	Solanacées
Radis	Cerise	<i>Raphanus sativus</i> L.	Crucifères
Sorgho	Jumbo	<i>Sorghum vulgare</i>	Graminées
Squash	Delica	<i>Cucurbita maxima</i>	Cucurbitacées
Tomate	Tropic	<i>Lycopersicum esculentum</i> M.	Solanacées

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

Espèce	Durée de la culture (j)	Stade de développement du plant témoin (dose 0)
Aubergine	15	2 vraies feuilles développées, la 3 ^e mesurant 3-4 cm au niveau du limbe
Carotte	13	3 vraies feuilles émergées, la 4 ^e mesurant 5-7 cm
Chou	26	4 à 5 vraies feuilles développées, la 4 ^e mesurant ~ 4 cm au niveau du limbe
Concombre	17	4 vraies feuilles, la 3 ^e mesurant 7-10 cm et la 4 ^e 3-4 cm au niveau du limbe
Haricot	10	2 ^e feuille trifoliée émergente, avec folioles mesurant 2 cm
Laitue	18	5 vraies feuilles (non cotylédonaire) émergées, la 6 ^e feuille mesurant 3-4 cm
Maïs	12	2 feuilles dégainées, la 4 ^e mesurant ~ 17 cm
Navet	15	4 à 5 vraies feuilles développées, la 4 ^e mesurant 3-4 cm au niveau du limbe
Pastèque	14	3 vraies feuilles émergées, la 3 ^e mesurant 4-7 cm et la 4 ^e ~4 cm au niveau du limbe
Poivron	21	8 vraies feuilles développées, la 9 ^e mesurant 3-5 cm au niveau du limbe
Radis	17	4 vraies feuilles développées, la 5 ^e mesurant 5-6 cm au niveau du limbe
Sorgho	11	3 feuilles dégainées, la 4 ^e mesurant ~ 20cm
Squash	14	5 vraies feuilles, la 4 ^e mesurant 7-8 cm et la 5 ^e 3-4 cm au niveau du limbe
Tomate	18	4 vraies feuilles développées, la 5 ^e mesurant 3-6 cm au niveau du limbe

Le protocole utilisé pour chaque expérimentation est le suivant :

Les graines sont traitées pendant 10 min avec NaOCl 1%, rincées à l'eau distillée puis mise à germer à 28 °C sur coton humide. Lorsque les plantules atteignent une taille suffisante (en général le racines doivent mesurer au moins 3-4 cm et l'épicotyle au moins 2-3 cm),

on sélectionne un lot homogène qui est mis en culture hydroponique (voir Fig. 1). Les plants sont transférées sur des pots (5 plants par pot de 1,8 litre) contenant une solution de Hoagland modifiée, diluée quatre fois et de pH 5,3 (composition : 1 mM Ca; 0,25 mM Mg; 1,5 mM K; 0,5 mM NH_4 ; 3,5 mM NO_3 ; 0,5 mM PO_4 ; 0,25 mM SO_4 ; 12,5 μM Cl; 6,25 μM B; 0,5 μM Mn; 0,5 μM Zn; 0,12 μM Cu; 0,12 μM Mo; 5 μM Fe-EDTA; 10 μM Na. Cf. les détails en annexe 1). Le nickel ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) est introduit dans les solutions dès le premier jour à différentes concentrations variant de 0 à 60 μM (0 à 3,52 mg Ni/l). Les solutions sont changées tous les 5 jours au début, puis tous les 3 jours à la fin. 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 traitements (Ni) et 3 répétitions (pots) par traitement.

La durée de culture sur solution dépend de l'espèce (de 10 jours pour les espèces à croissance rapide comme le maïs, à 26 jours pour les espèces à croissance plus lente comme le chou, la moyenne se situant à 15 jours; cf. tableau. 1). A la récolte, les racines et les parties aériennes sont séparés, pesées, lavées à l'eau distillée puis mises à sécher.

Neuf variétés de maïs ont également été testées (fournies par le CREA) : Irat 354, Irat 340, Irat 80, C84, C37, C87, X279, 6875, et Hycorn 90. Elles correspondent aux variétés testées par le CREA en 1995 sur le sol ferrallitique ferritique du site expérimental de Ouénarou. Le protocole utilisé est le même que celui décrit ci-dessus. La durée de la culture a été de 8 jours. Les mesures ont porté sur des échantillons moyens de 10 plants



Fig. 1. Système de culture.

2.2 Teneur en Ni dans la plante

Les tissus végétaux lavés sont séchés à 105°C pendant 24 h. Les échantillons secs sont alors pesés puis broyés. 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 faibles 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.

2.3 Calculs du taux de croissance, de l'influx et du transport de nickel

Le taux de croissance de la plante (GRC, pour Growth Rate Constant), l'influx (ou taux d'absorption) de Ni dans les racines (IN), et le transport de Ni depuis les racines vers les parties aériennes (TR) ont été calculés d'après les formules suivantes (Baligar *et al.*, 1993) :

$$\text{GRC} = (\text{LnPF2} - \text{LnPF1}) / (t2 - t1)$$

$$\text{IN} = [(\text{TNiP2} - \text{TNiP1}) / (t2 - t1)] * [\text{LnLR2} - \text{LnLR1}] / (\text{LR2} - \text{LR1})$$

$$\text{TR} = [(\text{TNiTF2} - \text{TNiTF1}) / (t2 - t1)] * [(\text{LnPTF2} - \text{LnPTF1}) / (\text{PTF2} - \text{PTF1})]$$

où : **PF** = poids de matière fraîche du plant entier (g/plant), **t** = temps (jours) entre le début (indice 1) et la fin (indice 2) des traitements Ni, **TNiP** = teneur en Ni dans la plante entière (nmol/plant), **LR** = longueur des racines (cm/plant), **TNiTF** = teneur en Ni dans les tiges et feuilles (nmol/plant), **PTF** = poids de matière sèche des tiges et feuilles (g/plant).

GRC est exprimé en g MF.plant⁻¹.j⁻¹, **IN** converti en nmol.cm⁻¹.s⁻¹, et **TR** en nmol.g MS⁻¹.s⁻¹.

3. RESULTATS

3.1 Symptômes de toxicité au nickel

Ces symptômes sont résumés dans le tableau 2. On constate les symptômes suivants :

Aubergine - (Fig. 2). A 5 μM les plants sont au même stade que le témoin. A partir de 10 μM , le développement des plants est très retardé, les feuilles chlorosées, voire nécrosées, surtout au niveau des feuilles les plus âgées.

Carotte - (Fig. 3). A 5 μM les plants sont au même stade que le témoin, mais avec une faible chlorose foliaire. A 10 μM les plants sont très petits par rapport au témoin, avec 2-3 vraies feuilles émergées, la feuille émergente mesurant moins de 1 cm. A cette concentration, des chloroses apparaissent rapidement (en moins d'une semaine) sur les nouvelles feuilles, puis il y a des nécroses au bord des feuilles les plus âgées. Une coloration violette peut être une étape intermédiaire suivant les chloroses.

Chou - (Fig. 4). A 5 μM Ni, le développement des plants est très retardé (la 3^e feuille émergant à peine), les feuilles sont nécrosées, surtout les plus âgées. La concentration de 10 μM semble déjà être létale.

Concombre - (Fig. 5). A 5 μM Ni, le développement des plants est retardé (3^e feuille mesurant 2-4 cm). A cette dose, et déjà après 8 jours de traitement, on observe une légère chlorose sur les feuilles les plus âgées (mais pas sur les feuilles cotylédonaire). A 10 μM , cette chlorose est très développée et des points jaunes apparaissent sur les feuilles cotylédonaire.

Tableau 3. Sévérité des symptômes visuels¹ de toxicité du nickel sur les espèces végétales testées.

Plante	Concentration en Ni dans la solution (μM)							
	0	5	10	15	20	40	60	80
Aubergine	-	-	+++	++++				
Carotte	-	++	++++	++++				
Chou	-	+++	++++	++++				
Concombre	-	+	+++	++++				
Haricot	-	-	++	+++				
Laitue	-	+	++	+++				
Maïs	-	-	-	-	-	+	+++	++++
Navet	-	+++	++++	++++				
Pastèque	-	+++	+++	++++				
Poivron	-	-	-	++				
Radis	-	++	+++	++++				
Sorgho	-	-	-	-	-	+++	++++	
Squash	-	++	++++	++++				
Tomate	-	+++	++++	++++				

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

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

Haricot - (Fig. 6). Tous les plants sont au même stade de développement : deuxième feuille trifoliée émergente. Les différences sont que les folioles de cette feuille mesurent 2 cm pour le témoin, et quelques mm pour la dose de 15 μM Ni. Une chlorose légère apparaît sur l'ensemble des feuilles à partir de 10 μM .

Laitue - (Fig. 7). Les stades de développement sont identiques à 0, 5 et 10 μM Ni. A 15 μM , les plants sont très petits avec 3-4 vraies feuilles émergées, toutes étant légèrement chlorosées, en particulier sur le bord.

Maïs - (Fig. 8). De légères chloroses internervaires apparaissent à partir de 40 μM Ni, surtout sur les jeunes feuilles.

Navet - (Fig. 9). A 4 μM Ni, les plants sont un peu moins développés que le témoin (4^e feuille mesurant 0,5-3 cm) et des chloroses internervaires apparaissent sur toutes les feuilles.

Pastèque - (Fig. 10). A 5 μM Ni, le développement des plants est retardé (3^e feuille mesurant 1-2 cm). Les concentrations de 5, 10 et 15 μM Ni sont très toxiques et les symptômes foliaires identiques : les 2 premières feuilles cotylédonaire sont entièrement chlorosées et nécrosées, la suivante (1^{ère} vraie feuille) est en partie nécrosée, et la 2^e vraie feuille est en partie chlorosée. Les symptômes sont donc faibles sur les jeunes feuilles, s'accroissent au cours de son vieillissement, et sont très développés sur les feuilles les plus âgées.

Poivron - (Fig. 11). A 4 μM Ni, le développement des plants est retardé (7^e feuille mesurant 2-3 cm). Les plants ne manifestent aucun symptôme particulier, mis à part une légère chlorose foliaire à 16 μM .

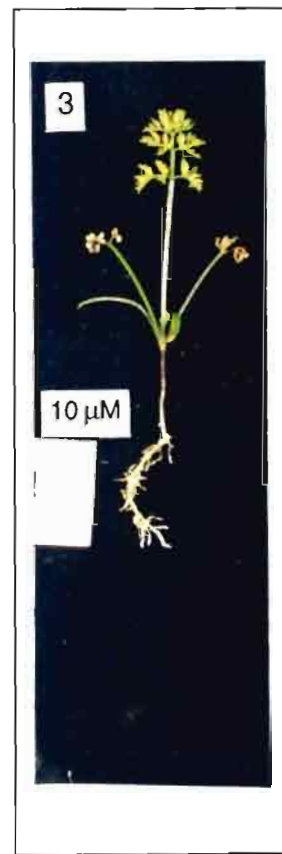
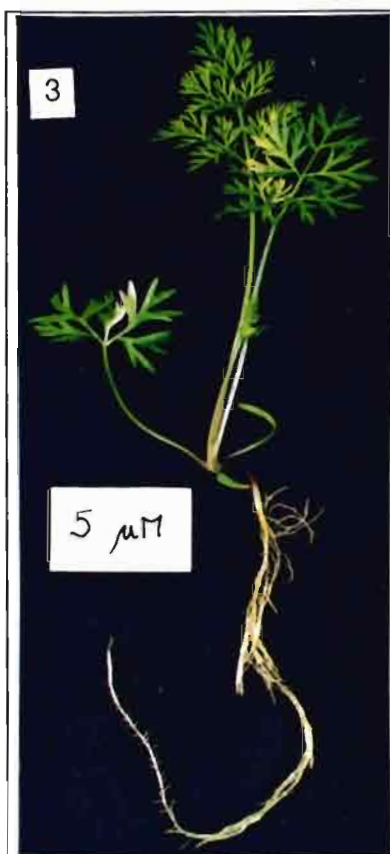
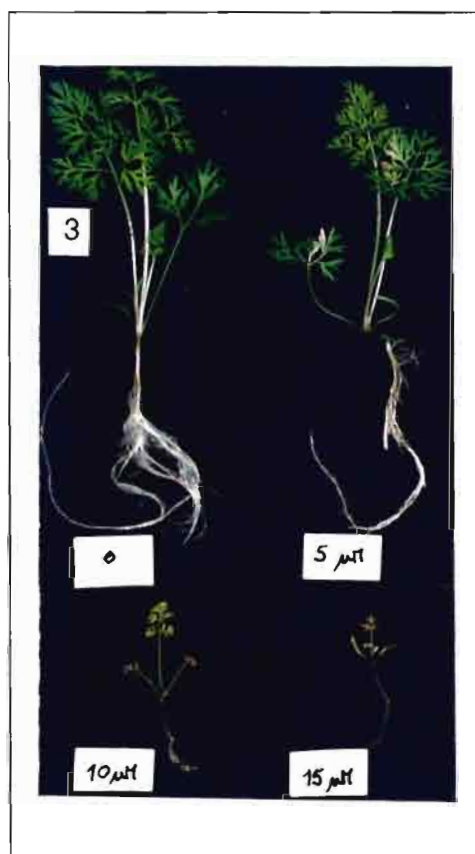
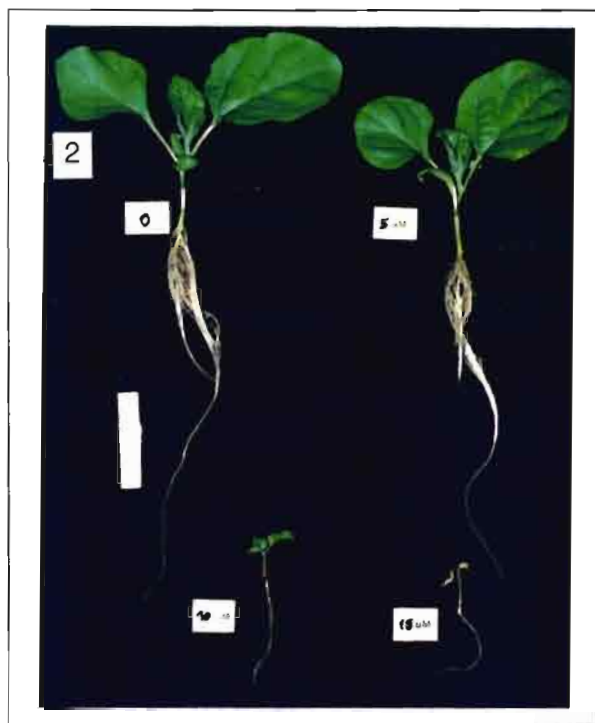
Radis - (Fig. 12). A 4 μM Ni, les plants ont comme le témoin 4 feuilles émergées, mais beaucoup plus petites, très chlorosées et nécrosées (surtout les feuilles les plus âgées).

Sorgho - (Fig.13). Le développement est identique à 0 et 20 μM Ni. A 40 μM , les plants sont retardés (2 feuilles dégainées), avec des chloroses internervaires, surtout au niveau des jeunes feuilles. Une coloration violette, en tâches, apparaît sur les racines.

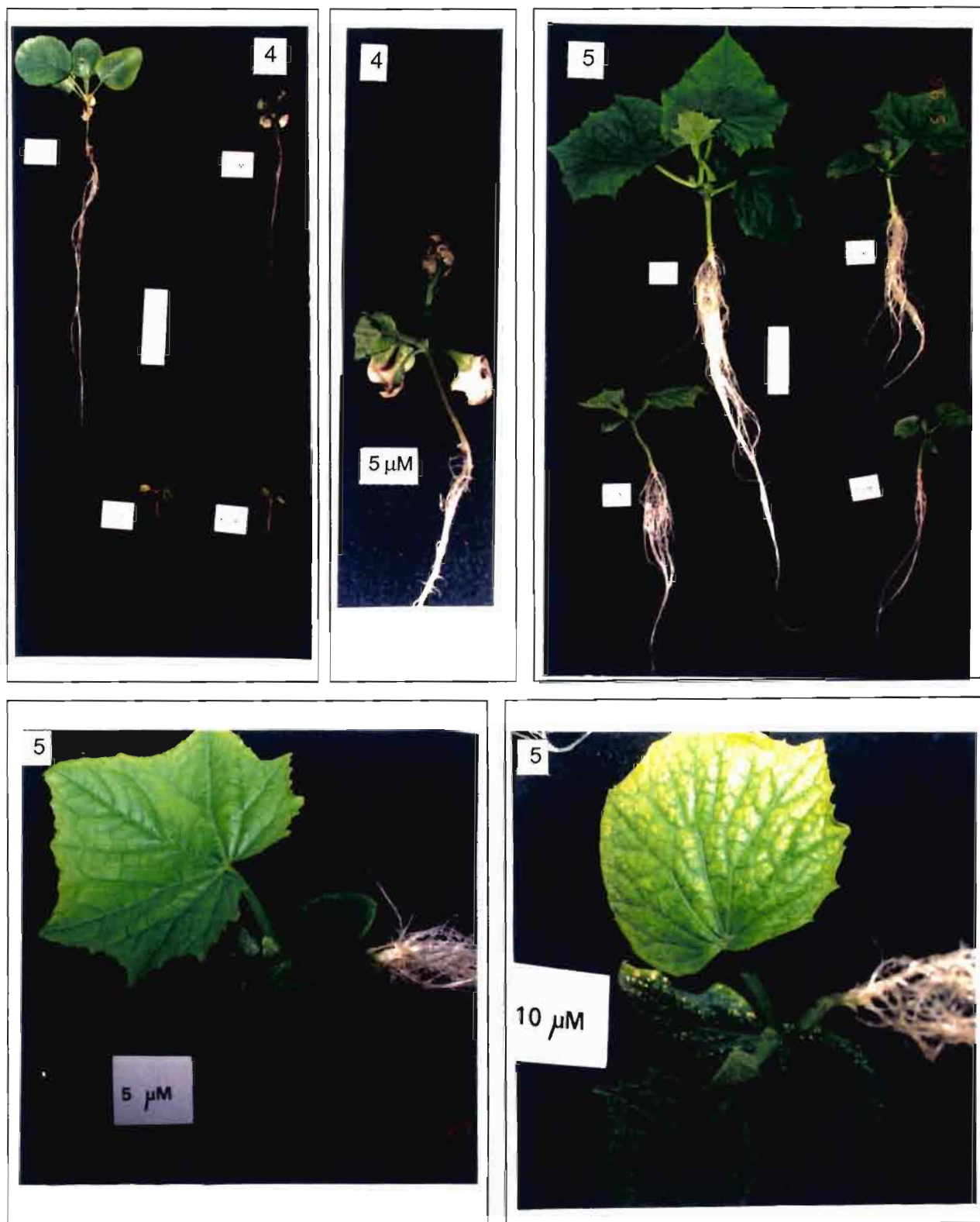
*Squash*¹ - (Fig. 14). A 5 μM Ni, le développement des plants est retardé (3^e feuille mesurant environ 2 cm). Des chloroses apparaissent sur les vraies feuilles, puis des nécroses, surtout sur les feuilles les plus âgées (mais pas les feuilles cotylédonaire).

Tomate - (Fig. 15). A 5 μM Ni, les plants ont comme le témoin 4-5 vraies feuilles émergées, mais sont plus petits. Dès 5 μM Ni, il y a des chloroses (avec nécroses au centre de la chlorose) sur toutes les feuilles (mais surtout les plus âgées), entre les nervures et plutôt sur le centre de la feuille. A 10 μM , les apex foliaires sont nécrosés, ainsi que les deux premières feuilles (cotylédonaire). La dose de 15 μM est quasiment létale.

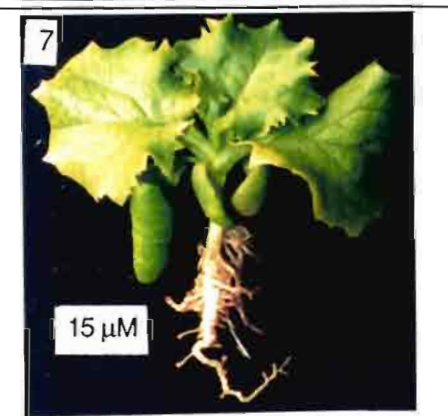
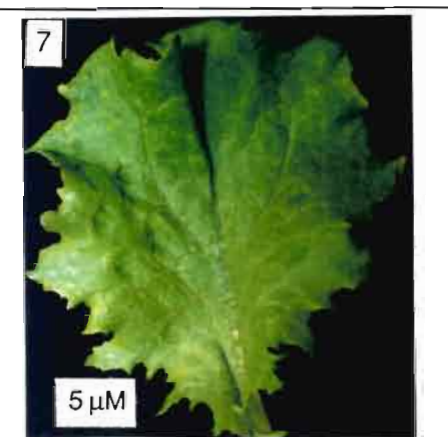
¹ Les résultats sur squash sont à vérifier car un problème fongique est soupçonné d'avoir perturbé le démarrage de la croissance des plants.



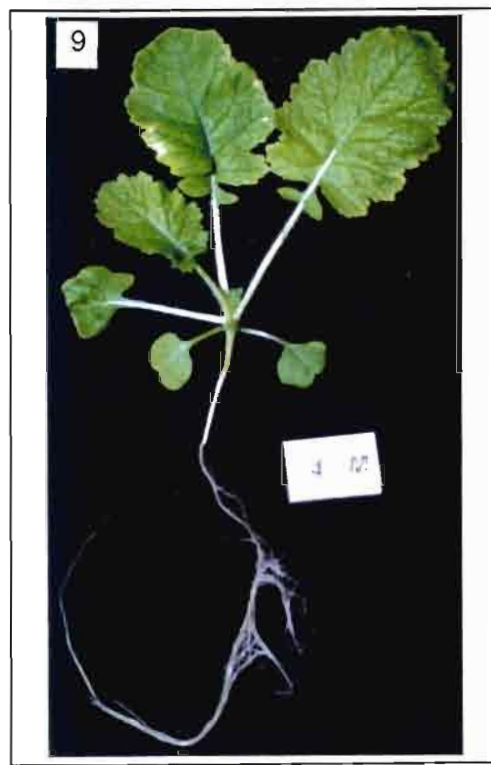
Figs. 2-3. Croissance de l'aubergine (2) et de la carotte (3) cultivées sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (0-5-10-15 μM).



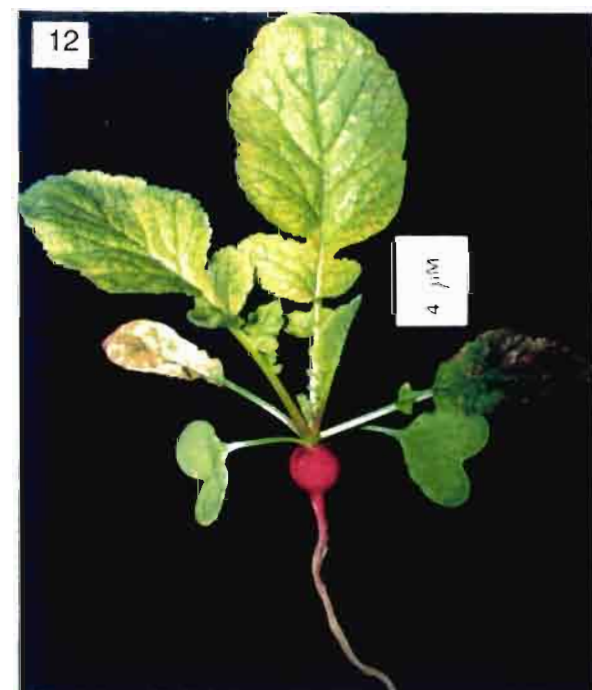
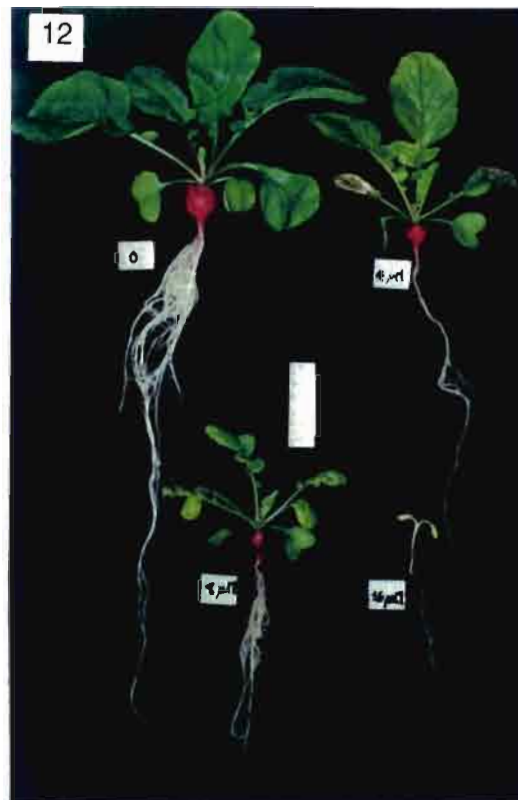
Figs. 4-5. Croissance du chou (4) et du concombre (5) cultivés sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (0-5-10-15 μM).



Figs. 6-7. Croissance du haricot (6) et de la laitue (7) cultivés sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (0-5-10-15 μM).



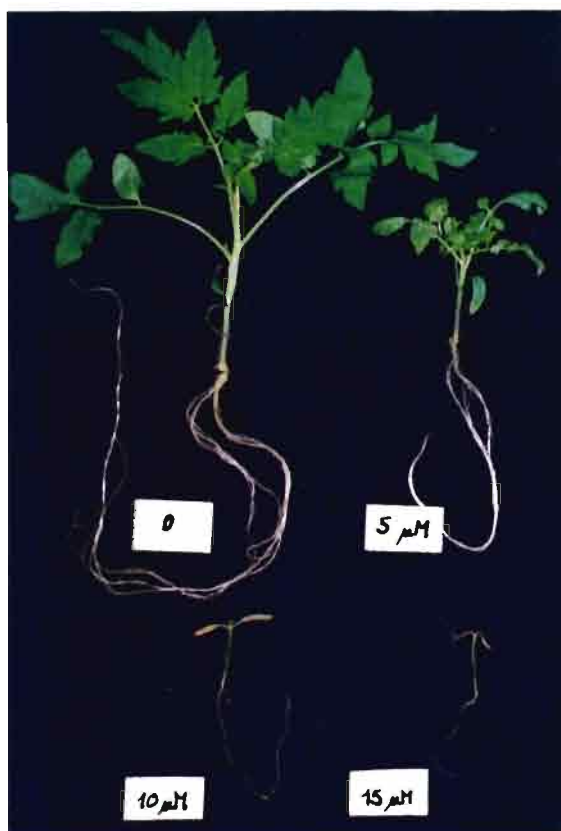
Figs. 8-10. Croissance du maïs (8), du navet (9) et de la pastèque (10) cultivés sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (maïs : 0-20-40-60-80 μM ; navet : 0-4-8-16 μM ; pastèque : 0-5-10-15 μM).



Figs. 11-12. Croissance du poivron (11) et du radis (12) cultivés sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (0-4-8-16 μM).



Figs. 13-14. Croissance du sorgho (13) et du squash (14) cultivés sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (sorgho : 0-20-40-60 μM ; squash : 0-5-10-15 μM).



Figs. 15. Croissance de la tomate (15) cultivée sur solution nutritive avec différentes concentrations en nickel (0-5-10-15 μM).

3.2 Croissance

La matière sèche totale du maïs et surtout celle du sorgho diminuent progressivement pour des concentrations en nickel supérieures à 20 μM (Fig. 16). La diminution est très importante dès 5 μM pour la pastèque, la tomate, le concombre, le chou, le poivron, le radis, le navet et le squash. Le haricot, la carotte et l'aubergine ont des réponses intermédiaires (diminution au delà de 5 μM) ainsi que le laitue (diminution brutale au delà de 10 μM). On retrouve les mêmes résultats au niveau de la matière sèche des feuilles et des racines (Figs. 17).

Les résultats sont globalement identiques au niveau du taux de croissance GRC (Fig. 18). On constate néanmoins que certaines plantes, malgré une intoxication forte dès 5 μM Ni, conservent une croissance soutenue. Ainsi, à 5 μM , le GRC du radis et du poivron reste élevé, tandis que celui de la pastèque, du chou et du concombre est faible. Le GRC est intermédiaire pour le navet, et la tomate. A 10 μM , le GRC de l'aubergine et de la carotte chute brutalement tandis qu'il diminue progressivement pour le haricot. Celui de la laitue diminue fortement à 15 μM . Pour le sorgho, GRC diminue fortement à 40 μM , tandis qu'il diminue légèrement pour la maïs à partir de 40 μM .

D'après la figure 19 on constate que le nickel affecte surtout la matière sèche des racines (augmentation du rapport Poids des Tiges et Feuilles / Racines) de la tomate, du chou, et dans une moindre mesure, du concombre, de l'aubergine, de la carotte, du haricot, du squash, du sorgho et du maïs (Fig. 19A). Par contre la toxicité est plus forte au niveau des tiges et feuilles (diminution du rapport) de laitue et de poivron (Fig. 19B). L'effet dépressif est sensiblement identique sur les racines et les parties aériennes de pastèque, radis et navet.

3.3 Teneurs en nickel dans la plante

Les teneurs en Ni dans les tiges et feuilles de chaque espèce augmente avec la concentration en Ni dans la solution nutritive (Fig. 20A). Les teneurs des espèces suivantes sont fortes : pastèque, tomate, concombre, chou (le plateau observé dès 5 μM pourrait être dû à une concentration létale), et le squash (à 5 μM). Les teneurs sont plus faibles pour la laitue et surtout pour le sorgho et le maïs.

Les teneurs en Ni dans les racines augmentent fortement pour toutes les espèces (Fig. 20B). Elles sont particulièrement fortes pour la laitue, la tomate, le radis, la pastèque, le concombre, la carotte et l'aubergine, alors qu'elles sont plus faibles pour le haricot, le poivron, le maïs, le sorgho, et probablement le squash.

3.4 Influx et transport de Ni

L'influx de Ni dans les racines (IN) augmente avec la concentration en Ni dans la solution pour pratiquement chaque espèce (Fig. 21A). IN est relativement faible pour le sorgho et le maïs, alors qu'il est fort pour les autres espèces, en particulier la laitue, le haricot et le concombre. IN diminue pour le radis et le poivron à Ni > 5 μM .

Le transport de Ni des racines vers les tiges et feuilles (TR) augmente avec la concentration en Ni dans la solution pour pratiquement chaque espèce (Fig. 21B). Toutefois TR diminue pour la laitue à $\text{Ni} > 10 \mu\text{M}$, et il atteint un plateau pour le squash à $\text{Ni} > 20 \mu\text{M}$ et le chou à $\text{Ni} > 5 \mu\text{M}$. On constate des différences très importantes entre les espèces, TR respectant globalement l'ordre suivant : concombre > pastèque > tomate > haricot, radis, aubergine > carotte, laitue > poivron > squash, sorgho, maïs.

3.5 Test variétal sur maïs

On constate des différences importantes entre les cultivars de maïs au niveau de leur croissance dans une solution avec $50 \mu\text{M}$ Ni (Fig. 22) : la diminution de la croissance est modérée pour X279, alors qu'elle est forte pour Irat 340, Irat 80 et C84.

S'agissant des teneurs en Ni dans la plante, il existe là aussi des différences importantes entre les cultivars, surtout au niveau des feuilles (Fig. 23) : le cultivar C87 a une teneur en Ni relativement faible ($\sim 100 \text{ ppm}$), alors que C84 a une teneur trois fois plus forte ($\sim 300 \text{ ppm}$).

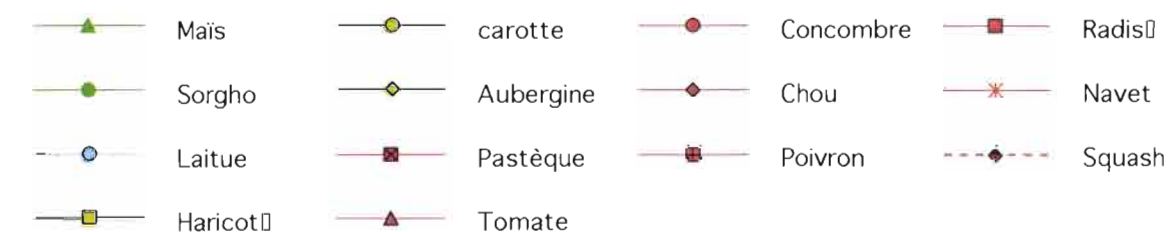
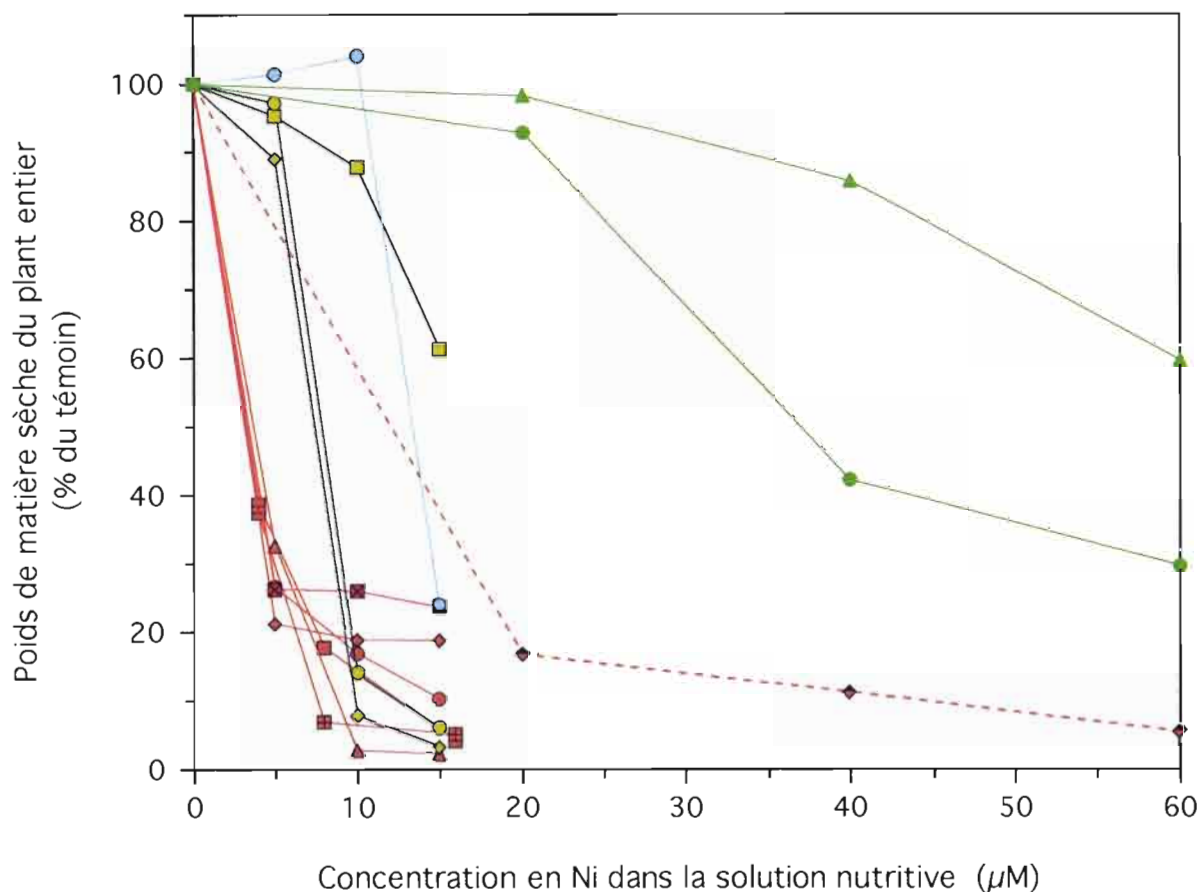


Fig. 16 . Croissance des différentes espèces en fonction de la concentration en nickel dans la solution nutritive. Croissance exprimée par le poids de matière sèche des plants entiers.

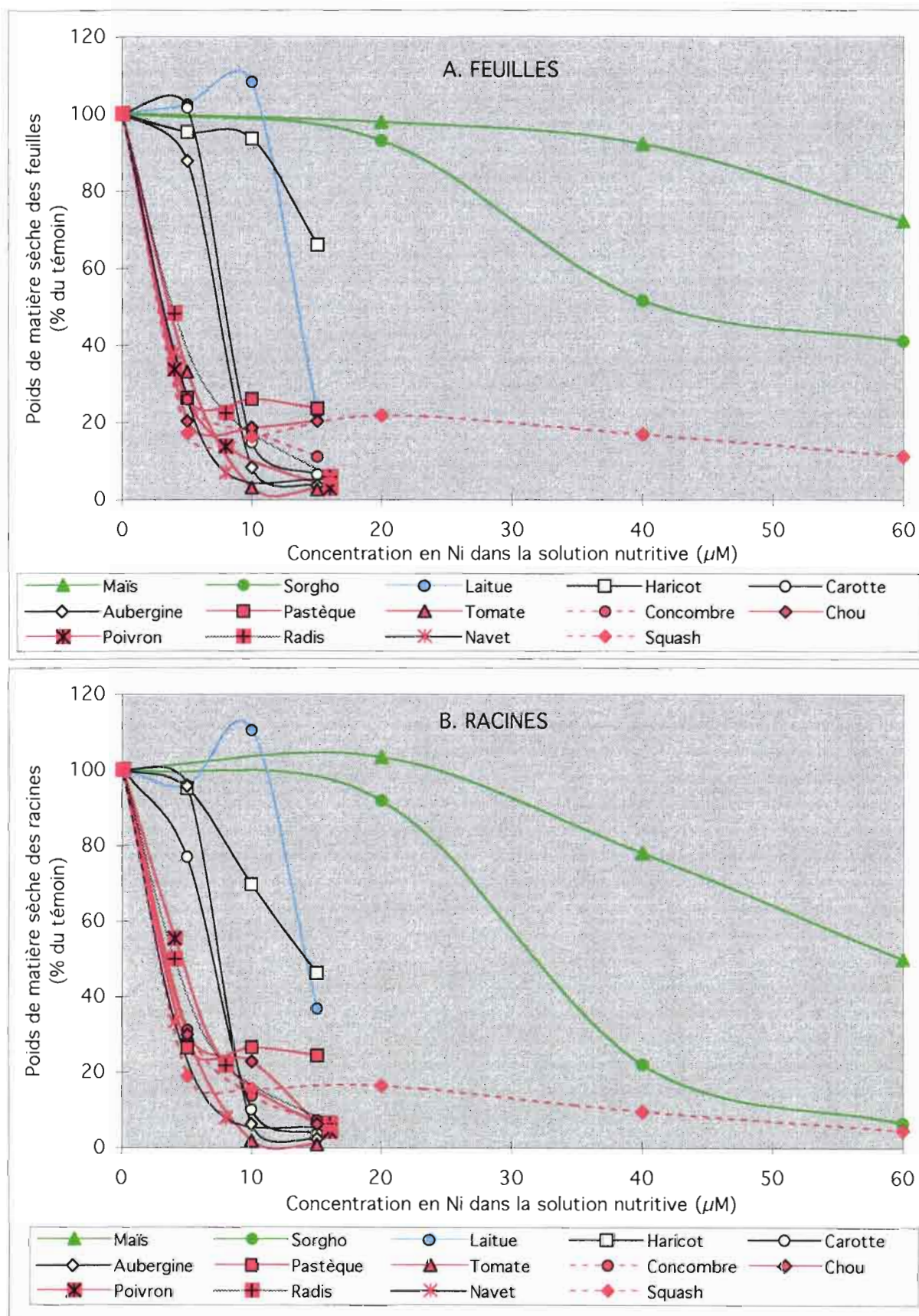


Fig. 17. Poids de matière sèche des feuilles (A) et des racines (B) des différentes espèces cultivées sur solution nutritive avec différentes concentrations en Ni.

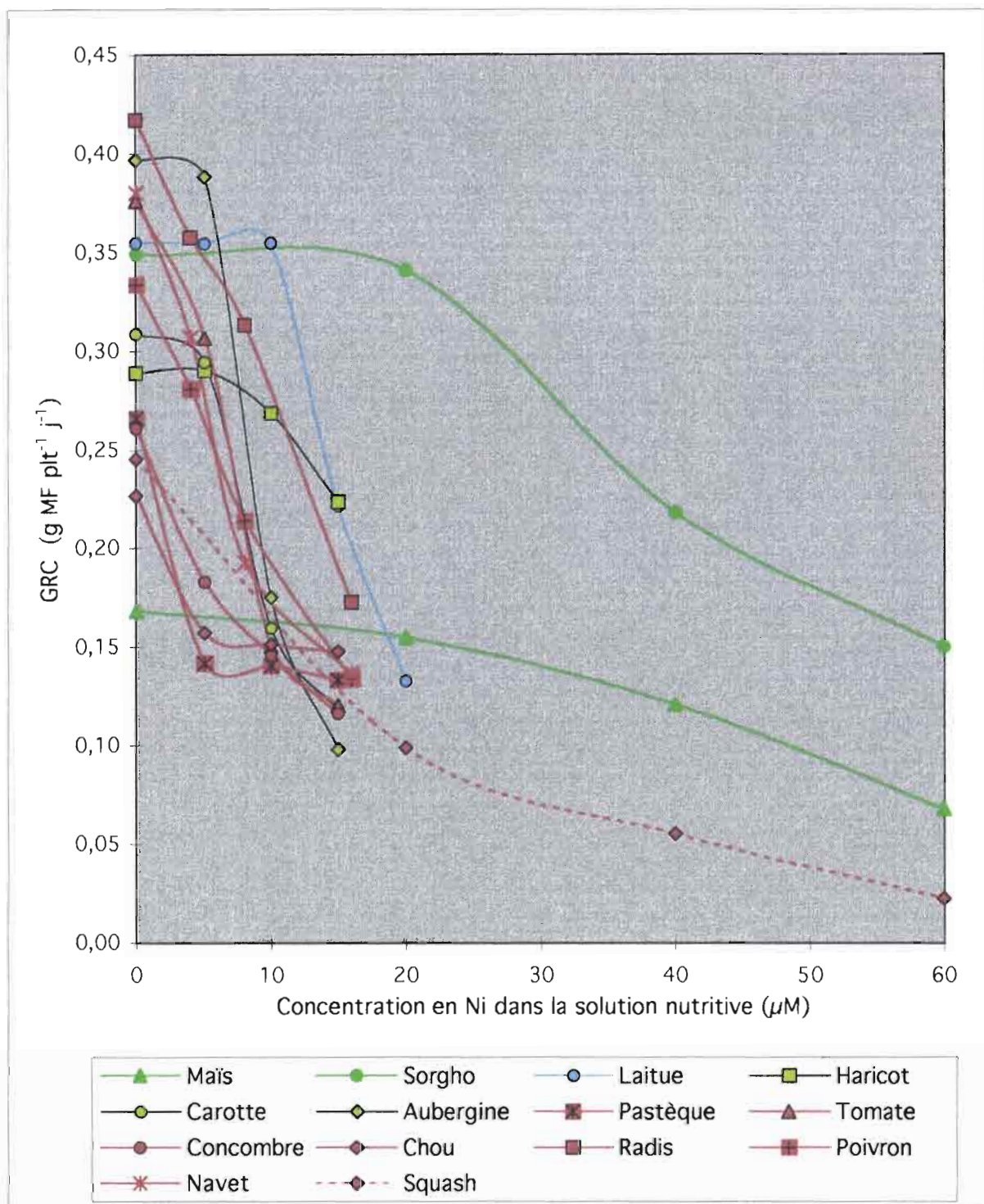


Fig. 18. Taux de croissance (GRC) de différentes espèces cultivées sur solution nutritive contenant différentes concentrations en nickel.

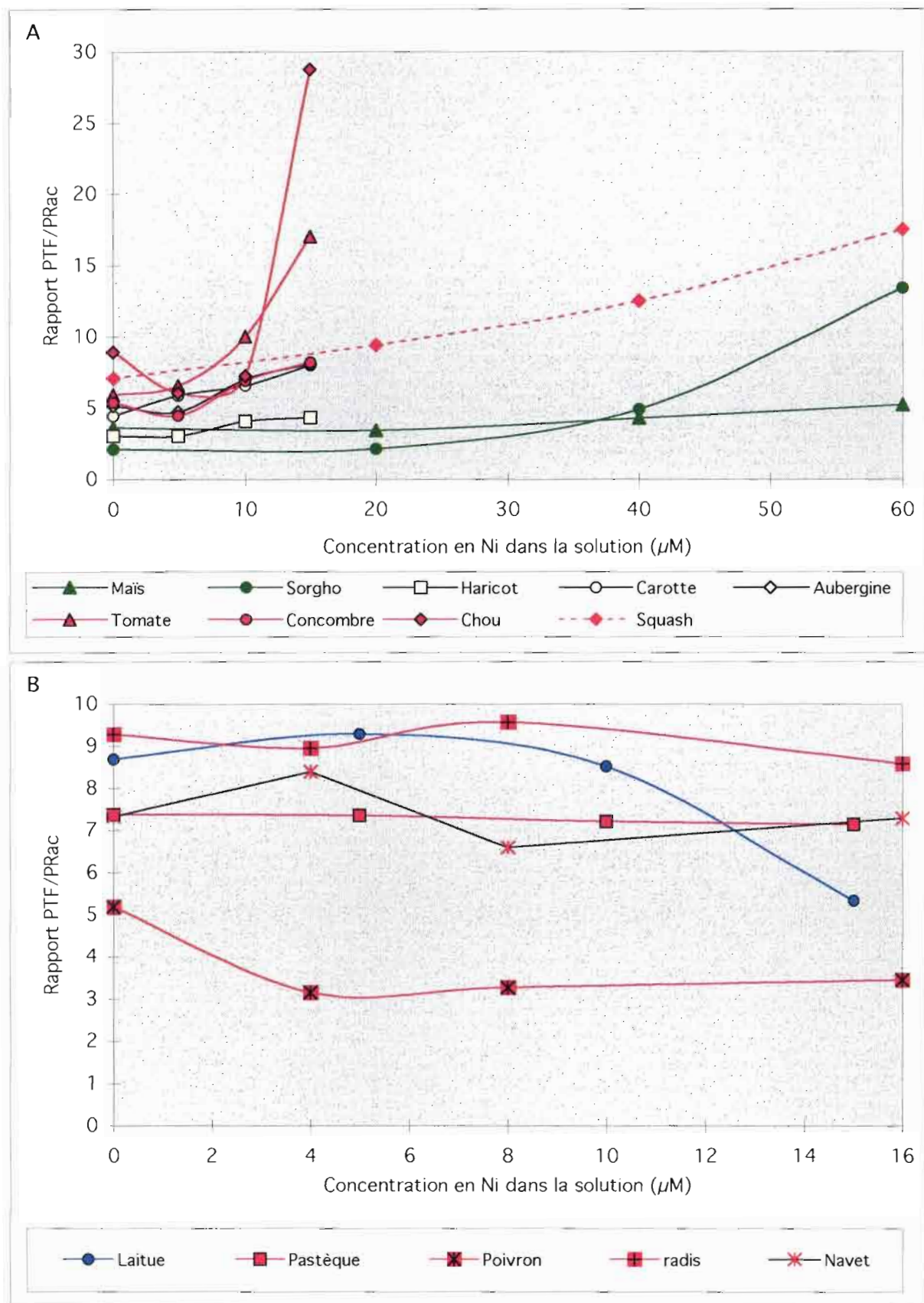


Fig. 19. Rapport Poids de matière sèche des Feuilles / Racines des différentes espèces cultivées sur solution nutritive avec différentes concentrations en Ni.

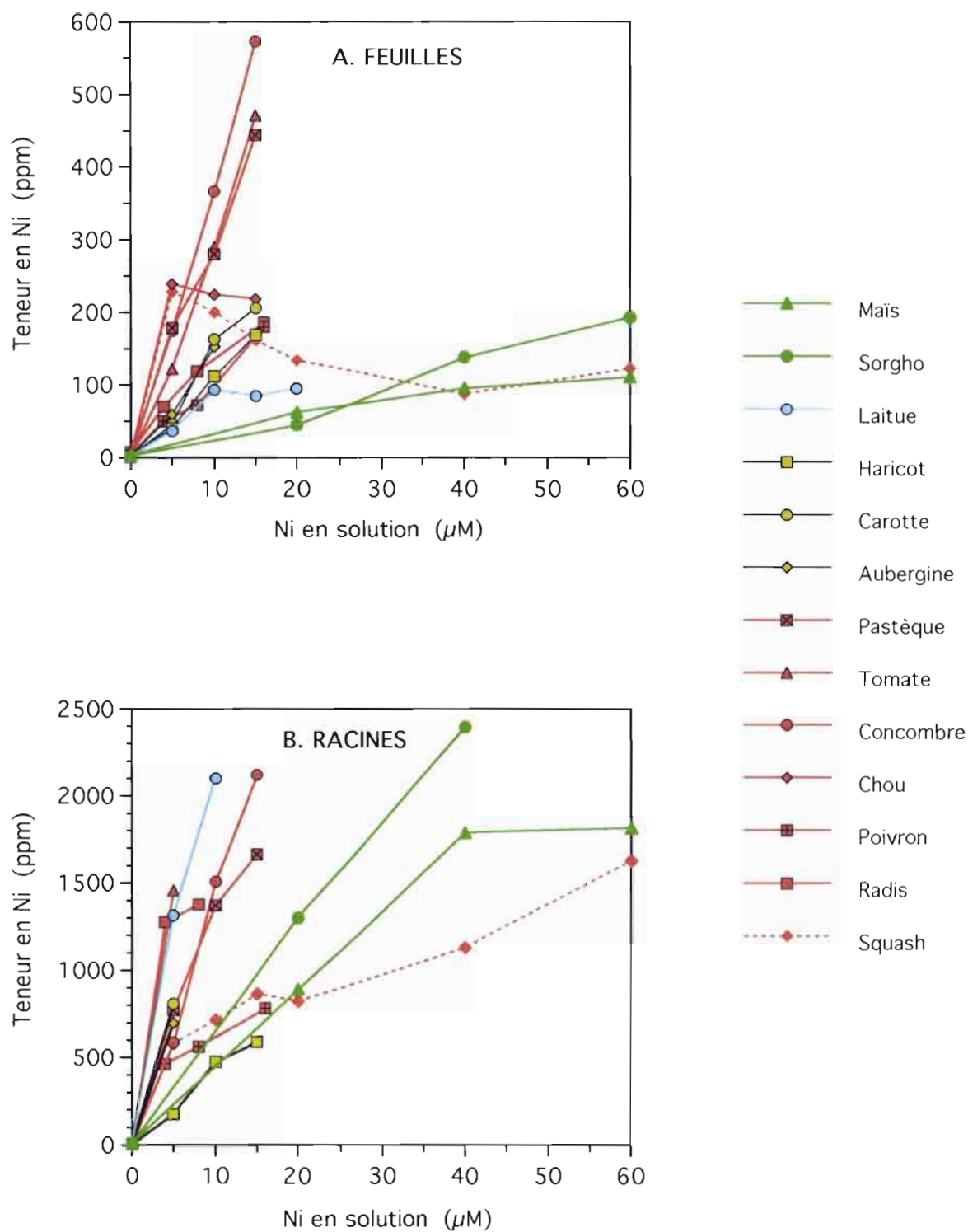


Fig. 20. Teneurs en nickel dans les feuilles et les racines des différentes espèces cultivées sur solution nutritive avec différentes concentrations en Ni.

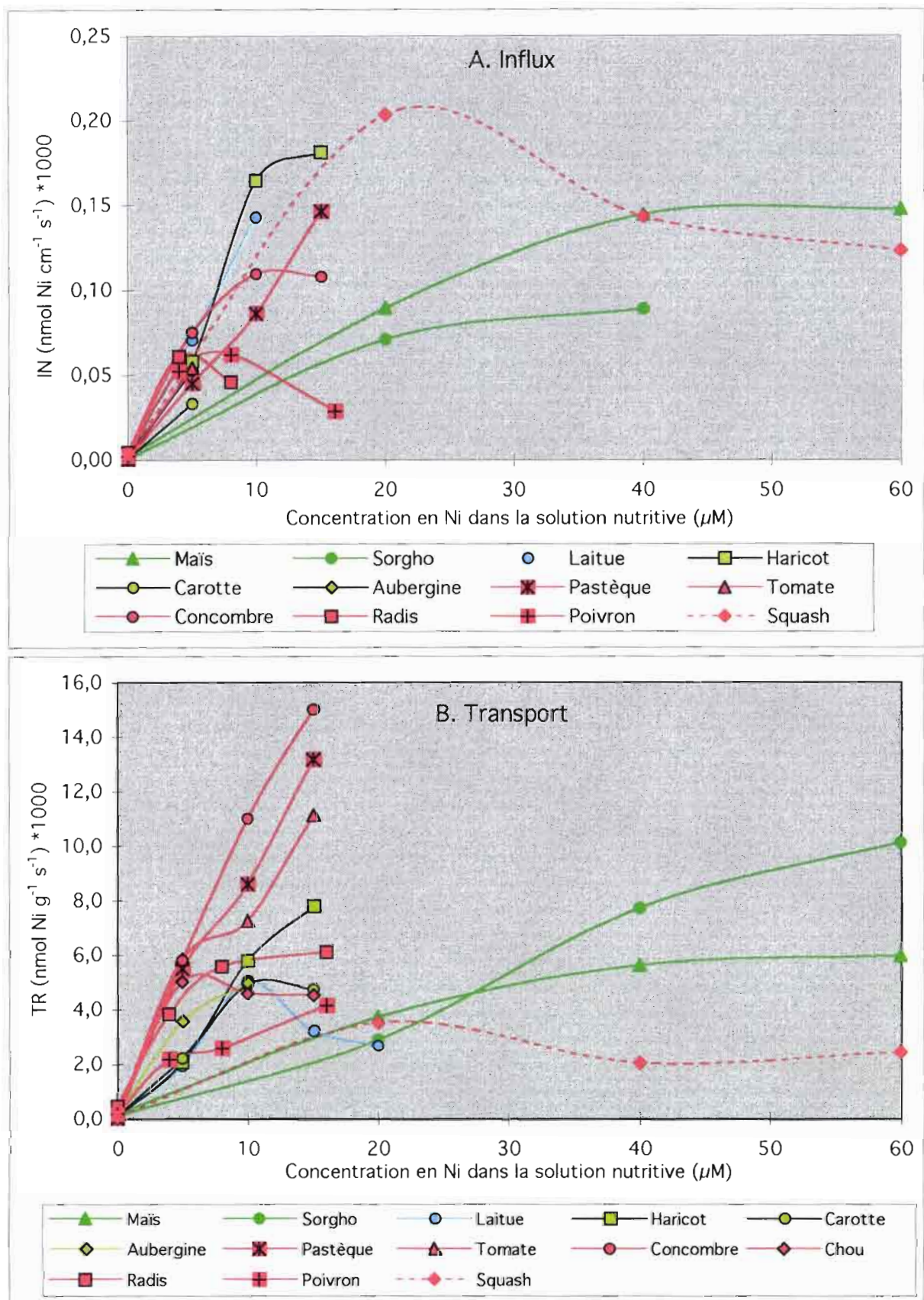


Fig. 21. Influx (IN) et transport (TR) de nickel chez les différentes espèces cultivées sur solution nutritive avec différentes concentrations en Ni.

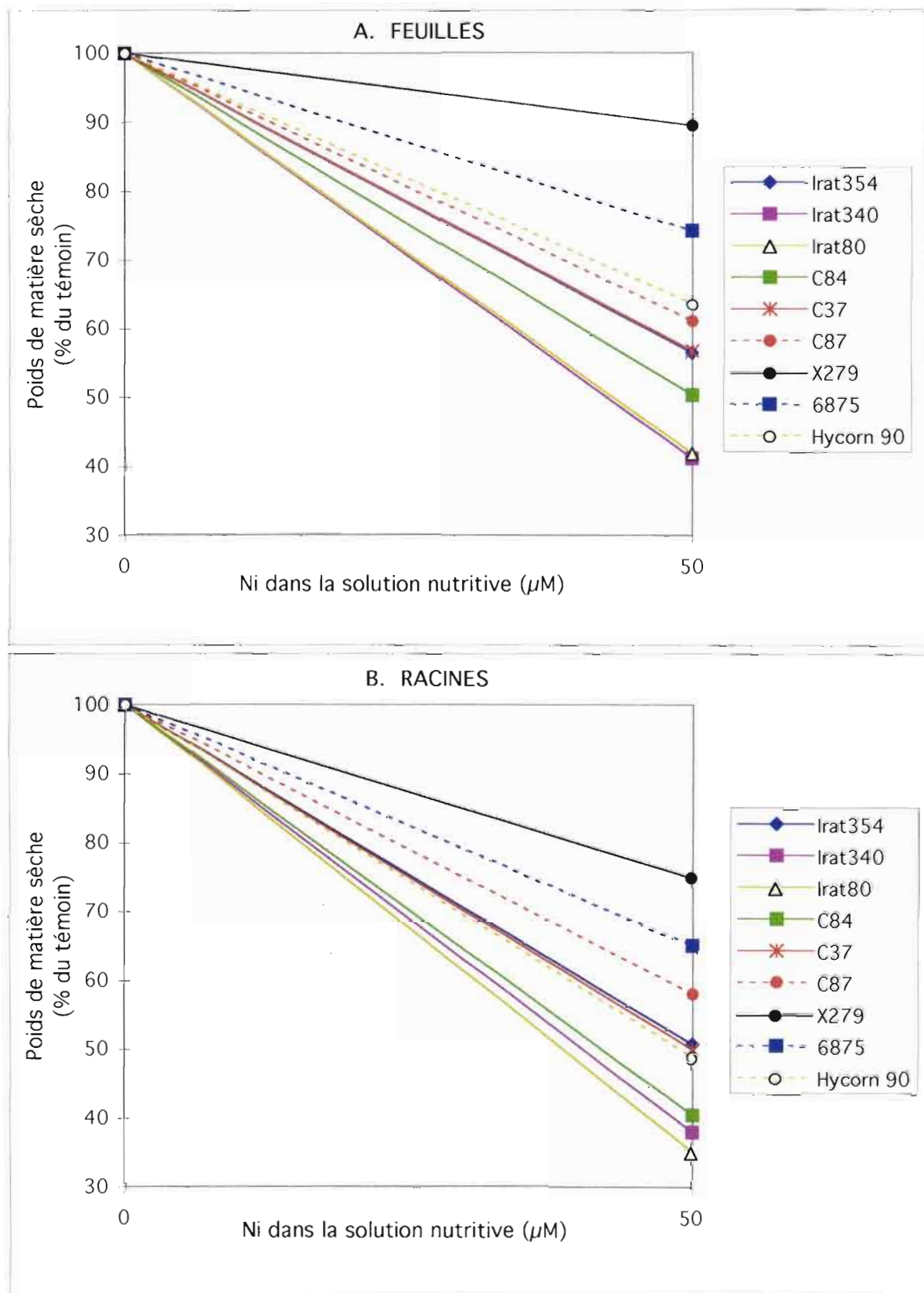


Fig. 22. Croissance des feuilles (A) et des racines (B) des différents cultivars de maïs cultivés sur solution nutritive contenant 0 ou 50 μM de Ni.

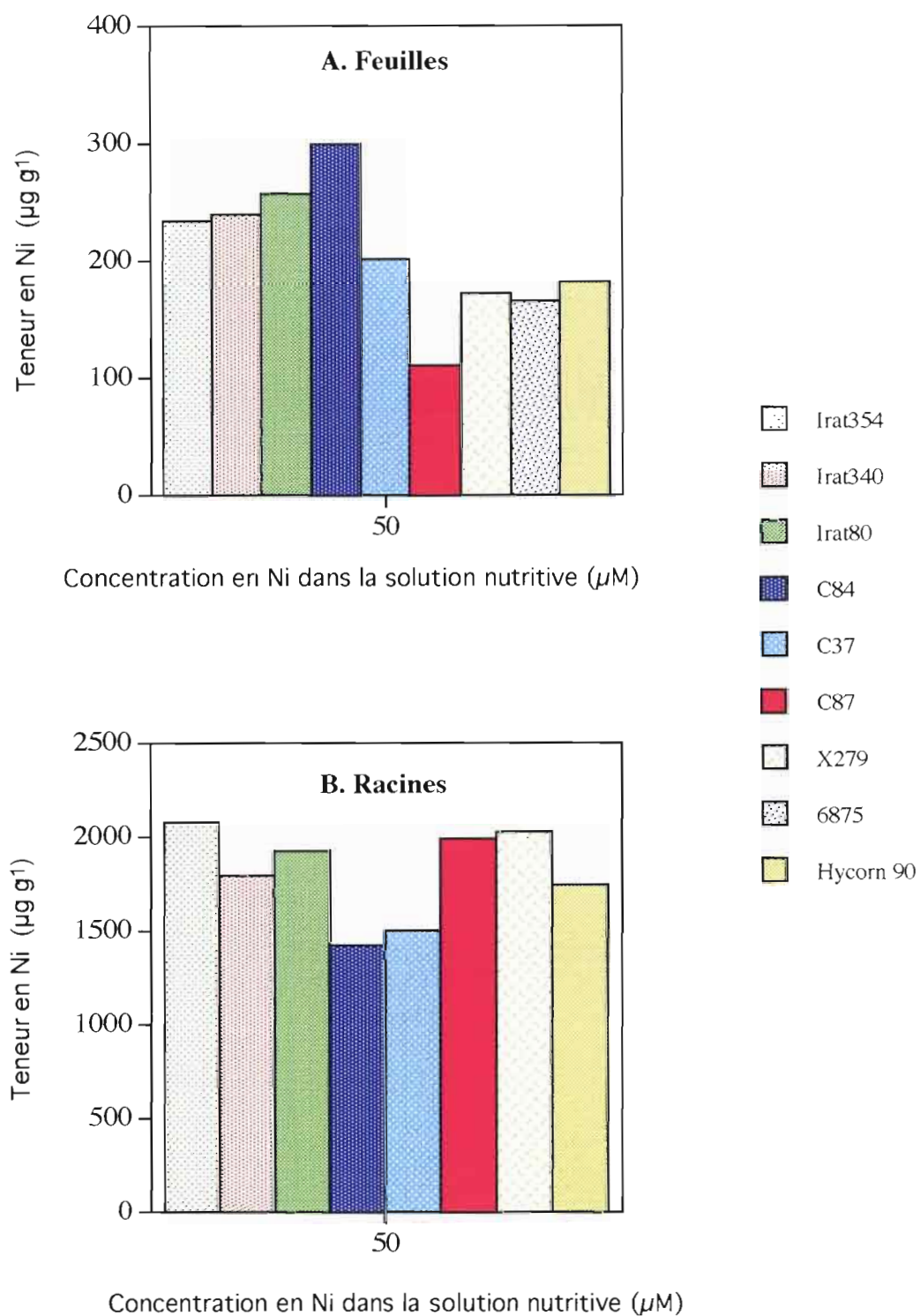


Fig. 23. Teneurs en nickel dans les feuilles (A) et les racines (B) des différents cultivars de maïs cultivés sur solution nutritive contenant $50 \mu\text{M}$ de Ni.

4. DISCUSSION

Les différences d'accumulation et de tolérance au nickel entre les différentes plantes, en particulier les plantes endémiques, ont été largement étudiées (Brooks, 1987 ; Jaffré, 1980 ; Reeves, 1992). Des différences sont aussi connues entre les plantes cultivées et les cultivars (Bingham *et al.*, 1986 ; L'Huillier *et al.*, 1996 ; Piccini et Malavolta, 1992 ; Sauerbeck et Hein, 1991).

Dans cette étude, on constate effectivement des différences importantes dans la sensibilité au nickel des plantes cultivées (Figs. 2-15 et 16). Il apparaît clairement l'ordre suivant : (1) les plantes les plus sensibles montrant une très forte diminution de croissance dès 5 μM de Ni dans la solution : pastèque, tomate, concombre, chou, poivron, radis, navet et squash (une vérification s'impose toutefois pour ce dernier) ; (2) les plantes assez sensibles montrant une forte diminution de croissance au delà de 5 μM : carotte et aubergine ; (3) les plantes moyennement sensibles : haricot (croissance faiblement diminuée à 10 μM) et laitue (croissance diminuée seulement au delà de 10 μM) ; (4) les plantes les moins sensibles montrant une diminution de croissance au delà de 20 μM : sorgho et surtout maïs.

Ces résultats sont en grande partie en accord avec ceux d'autres auteurs (cf. chap. 1 dans L'Huillier, 1994). De plus, d'une manière générale, ces résultats semblent confirmer la tendance selon laquelle les monocotylédones - comme le maïs, l'orge, le sorgho et le blé - sont souvent plus tolérantes que les dicotylédones cultivées (Hunter et Vergnano, 1952; Sauerbeck and Hein, 1991; Yang *et al.*, 1996; L'Huillier, 1994).

Notons que les concentrations toxiques de nickel dans la solution observées ici correspondent aux niveaux toxiques observés pour d'autres plantes cultivées dans des conditions très proches (Krupa *et al.*, 1993 ; Moya *et al.*, 1993 ; Piccini et Malavolta, 1992).

Par ailleurs, les travaux de Becquer *et al.* (1997) ont montré que les solutions de sol récoltées sur sols ferrallitiques ferritiques (site de Ouénarou, zone de glaci) ont des concentrations en Ni variant de 0 à 9 μM . Ces résultats sont à comparer à ceux de cette étude, en particulier à la concentration de 5 μM de Ni toxique pour plusieurs plantes (voir ci-dessus). De plus, les solutions de sols prélevées sur ces sols sont relativement pauvres en nutriments, ce qui augmente encore l'activité toxique du nickel (L'Huillier, 1994). On peut alors raisonnablement supposer que les plantes les plus sensibles seraient intoxiquées dans les zones de sols ferrallitiques ferritiques où Ni est le plus disponible, c'est à dire en plaine et en zone colluvio-alluviale avec conditions hydromorphes, en particulier sur les horizons de surface (Becquer *et al.*, 1995; L'Huillier et Edighoffer, 1996). Les risques de toxicité pour ces plantes sont vraisemblablement élevés sur tous les sols du Territoire dérivés de roches ultrabasiques (travaux en cours).

Les teneurs en Ni dans les différents végétaux cultivés varient également fortement suivant l'espèce (Fig. 20). On constate globalement que les espèces les plus sensibles ont de fortes teneurs en Ni dans leurs feuilles et un fort transport (cf. Fig. 21 B), (en particulier concombre, tomate, pastèque, chou, radis), alors que les espèces les plus résistantes ont de faibles teneurs dans les feuilles et un faible transport (surtout maïs, sorgho), ce qui est en accord avec Yang

et al. (1996). D'une manière générale, les espèces transportant fortement Ni vers les feuilles paraissent donc être des espèces sensibles (à part le poivron qui transporte modérément Ni et qui est pourtant sensible). Il pourrait y avoir une explication physiologique, comme par exemple une action privilégiée du nickel au niveau de processus métaboliques existant dans les feuilles et pas dans les racines (comme la photosynthèse).

Par contre, certaines espèces comme la laitue semblent résister au nickel par un blocage au niveau racinaire (fort influx et forte accumulation racinaire contre un transport modéré ; cf. Figs. 20, 21).

D'autres comme le sorgho et le maïs, et dans une moindre mesure le haricot, agissent plutôt comme des « excluders » (faible influx, faible teneur dans les racines, et assez faible transport).

D'après les figures 16 et 20A, des seuils de toxicité ont été évalués pour quelques espèces, celles pour lesquelles il existe une concentration en Ni juste avant l'apparition de la toxicité (ce qui exclut les espèces intoxiquées dès la première concentration de 5 μM). Le tableau suivant indique ces seuils de toxicité, sachant que le stade de développement de la plante est à prendre en compte impérativement (cf. tableau 2 et paragraphe 3.1), car la teneur en Ni d'une plante varie beaucoup au cours de son développement (L'Huillier, 1994) :

Tableau 4. Seuils de toxicité.

Plante	Concentration en Ni dans la solution juste avant toxicité (μM)	Seuil de toxicité (teneur en Ni dans les feuilles) (ppm)
Maïs	~ 20	~ 60
Sorgho	~ 20	~ 44
Laitue	~ 10	~ 90
Haricot	~ 5	~ 40

S'agissant des symptômes de toxicité, d'une manière générale il n'y a ni symptômes avant diminution de la croissance, ni de symptômes spécifiques, ce qui exclu toute possibilité d'utilisation de critères visuels pour un diagnostic précoce. Il n'y a guère que la carotte qui manifeste une faible chlorose foliaire en même temps qu'un début de ralentissement de croissance à 5 μM Ni, et surtout la laitue qui manifeste une légère chlorose (10 à 30 % de la surface foliaire) sans montrer de ralentissement de croissance à 10 μM Ni.

D'une manière générale, mis à part le poivron qui ne montre aucun symptôme même avec une forte diminution de sa croissance, une toxicité est toujours associée à des chloroses foliaires, voire de nécroses. Ainsi, pour les monocotylédones testées (maïs et sorgho) 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 d'autres résultats (Hunter et Vergnano, 1952 ; Mishra et Kar, 1974 ; Vanselow, 1966).

Concernant les cultivars de maïs, on constate des différences importantes au niveau de la croissance et de l'absorption de Ni (Figs. 22, 23). A propos de l'absorption, certains cultivars ont des comportements très différents : C87 et X279 accumulent beaucoup de Ni dans leurs racines et peu dans leurs feuilles, alors que c'est l'inverse pour C84 (transport important).

Il y a une assez bonne corrélation négative entre la croissance et la teneur en Ni dans les feuilles : les cultivars les plus sensibles (Irat 340, Irat 80 et C84) ont les teneurs en Ni dans les feuilles les plus fortes. Inversement, les cultivars les plus résistants (X279 et 6875) ont des teneurs en Ni dans les feuilles relativement faibles, en même temps que de fortes teneurs dans les racines. Une grande sensibilité semble donc liée à un important transport de Ni des racines vers les feuilles, alors qu'une résistance semble liée à une accumulation importante dans les racines et un faible transport.

Par contre, si on compare ces résultats avec ceux obtenus en 1995 sur le sol ferrallitique ferritique du site expérimental de Ouénarou, on constate une quasi-absence de corrélation : les cultivars les plus productifs sur le champ (Irat 354 et C 84) s'avèrent être relativement sensible (Irat 354) à très sensible au nickel (C 84). Cela signifie probablement que le nickel n'a pas été un facteur limitant dans le développement des cultivars de maïs cultivés sur le sol de Ouénarou en 1995. Cela rejoint d'ailleurs les résultats de cette étude (cf. plus haut) selon lesquels le maïs est une espèce végétale relativement résistante comparée à de nombreuses espèces maraîchères.

5. CONCLUSION

La culture sur solution apparaît comme un outil efficace, par sa précision et sa relative facilité de mise en oeuvre, pour comparer la sensibilité au nickel de différentes espèces ou cultivars.

Elle a permis dans cette étude de distinguer avec précision la sensibilité au nickel de plusieurs espèces cultivées. Il ressort ainsi que plusieurs espèces, comme la tomate, la pastèque, le concombre, le chou, le poivron, le radis, le navet et le squash sont beaucoup plus sensibles que le sorgho et le maïs.

Il est possible que les monocotylédones soient d'une manière générale plus résistantes que les dicotylédones, mais cela demande encore à être vérifié avec d'autres espèces, en particulier des monocotylédones.

Par ailleurs, la première concentration de 5 μ M de Ni en solution s'est avéré très toxique pour de nombreuses espèces (comme celles signalées ci-dessus). En conséquence, de façon à mieux distinguer ces espèces entre elles et préciser leur seuil de toxicité, il faudra à nouveau les expérimenter avec des concentrations en Ni inférieures à 5 μ M.

Enfin, expérimenter des espèces pérennes avec ce système de culture (telles que agrumes, bananier, ...) constituera un des objectifs à atteindre à partir de 1997.

REFERENCES

- Baligar V.C., Schaffert R.E., Dos Santos H.L., Pitta G.V.E. and Bahia Filho A.F.D.C. 1993. Growth and nutrient uptake parameters in sorghum as influenced by aluminium. *Agronomy J.* 85 : 1068-1074.
- Becquer T., Bourdon E. et Pétard J. 1995. Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *C.R. Acad. Sci.* 321, série II a : 585-592.
- 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.
- Bingham F.T., Peryea F.J. and Jarrel W.M. 1986. Metal toxicity to agricultural crops. *Metal Ions Biol. Syst.* 20 : 119-156.
- Brooks, R. R. 1987. Serpentine and its vegetation. A multidisciplinary approach. Diacorides Press, Portland, OR, 454 pp.
- Jaffré T. 1980. Etude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, N°124, 273 pp.
- Brown P.H, R.M. Welch and E.E. Cary. 1987. Nickel : A micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiol.* 85: 801-803.
- 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.
- Jaffré T. 1980. Etude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, N°124, 273 pp.
- Krupa Z., A. Siedlecka, W. Maksymiec and T. Baszynski. 1993. *In vivo* response of photosynthetic apparatus of *Phaseolus vulgaris* L. to nickel toxicity. *J. Plant Physiol.* 142: 664-668.
- 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. 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.
- L'Huillier L., d'Auzac J., Durand M. and Michaud-Ferrière N. 1996. Nickel effects on two maize cultivars : growth, structure, Ni concentration and localization. *Canadian. J. of Botany* 74 : 1547-54.
- Mishra D. and M. Kar. 1974. Nickel in plant growth and metabolism. *The Bot. Review* 40: 395-452.

Moya J. L., R. Ros and I. Picazo. 1993. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Research* 36: 75-80.

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.

Reeves R. D. 1992. *In: The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*. A. J. M. Baker, J. Proctor and R. D. Reeves, eds., Intercept, Andover, Hampshire, UK, Chap. 20, p. 253.

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.

ANNEXE 1

Solution nutritive de Hoagland modifiée, concentrée 100 fois *

Produit	Qtés (g/l)	N	K	Ca	P	S	Mg	Cl	B	Mn	Zn	Cu	Mo	Fe
KNO ₃	60,2	8,34	23,3											
Ca(NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	94,4	11,2		16										
KCl	0,372		0,2					0,177						
NH ₄ H ₂ PO ₄	23	2,8			6,2									
MgSO ₄ , 7H ₂ O	24,6					3,2	2,4							
H ₃ BO ₃	0,155								0,027					
MnSO ₄ , H ₂ O	0,034					0,01				0,011				
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	0,058					0,01					0,013			
CuSO ₄ , 5H ₂ O	0,012					0						0,003		
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 4H ₂ O	0,009												0,005	
FeEDTA	**													0,112
Quantité apportée (g/l)		22,4	23,5	16	6,2	3,2	2,4	0,177	0,027	0,011	0,013	0,003	0,005	0,112

* 1 litre de solution mère donne 400 litres de solutions filles Hoaland 1/4.

** Préparer séparément : 0,548 g FeSO₄, 7H₂O + 0,737 g EDTA-Na₂ dans un peu d'eau (200 ml), puis ajouter à la solution d'oligo-éléments (1 litre).

