

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 18

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

Laurent L'HUILLIER

Avenant 2 à la convention
ORSTOM/Province Sud
du 5 juin 1992

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPEDOLOGIE

N° 18

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

Laurent L'HUILLIER

Avenant 2 à la convention
ORSTOM/Province Sud
du 5 juin 1992



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

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1993

L'Huillier, L.

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. Avril 1993. 50 p.
Conv. : Sci. Vie : Agropédol. ; 18

Ø76AGROØ5

ETUDE EXPERIMENTALE ; NICKEL ; TOXICITE ; ZEA MAYS ; VARIETE ; CROISSANCE ;
DEVELOPPEMENT ; NUTRITION ; SOL FERRALLITIQUE FERRITIQUE / NOUVELLE
CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
de Nouméa
Avril 1993



AVERTISSEMENT

Ce rapport rend compte des résultats obtenus en 1992 sur deux expérimentations en serre et sur diverses expérimentations au laboratoire concernant les effets de doses toxiques de sulfate de nickel sur la nutrition, la croissance et le développement complet du maïs.

Ces recherches ont été conduites au titre de la troisième opération - concernant l'influence des métaux lourds présents dans les sols ferrallitiques du Sud sur la croissance et le développement des plantes cultivées - de l'avenant 2 à la Convention Province Sud - ORSTOM pour l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre.

Ont contribué à sa réalisation :

- S. Edighoffer, E. Ouckewen, L. Taputuarai et W. Nigote du laboratoire d'Agropédologie ;

- J. Pétard, Chef du Laboratoire d'Analyses et les membres de son équipe.

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

SOMMAIRE

	Pages
DOCUMENTS ANTERIEURS.....	5
RESUME , MOTS-CLES	7
1. INTRODUCTION	9
2. MISE EN PLACE ET CONDUITE DES EXPERIMENTATIONS.....	9
2.1. Expérimentations en serre 1 et 2 : influence du nickel sur le développement du maïs et sur l'absorption des éléments par le maïs.....	9
2.1.1. Choix et quantités de sol.....	9
2.1.2. Doses de nickel utilisées	10
2.1.3. Type des expérimentations.....	10
2.1.4. Mise en place et conduite des expérimentations	10
2.2. Expérimentations en laboratoire : différences variétales de sensibilité au nickel et influence des nutriments sur l'absorption du nickel par le maïs.....	11
2.2.1. Matériels et méthodes	11
2.2.2. Les expérimentations	12
3. RESULTATS.....	12
3.1. Expérimentation 1 : influence du nickel sur le développement du maïs.....	12
3.2. Expérimentation 2 : seuil toxique du nickel et son influence sur l'absorption des éléments par le maïs	15
3.3. Expérimentations en laboratoire	16
3.3.1. Différences variétales de sensibilité au nickel du maïs.....	16
3.3.2. Influence des nutriments sur l'absorption du nickel par le maïs	16
4. DISCUSSION.....	19
4.1. Conséquences de l'intoxication par le nickel sur le développement de la plante.	19
4.2. Seuil toxique du nickel dans les tiges et feuilles du maïs	19
4.3. Influence du nickel sur l'absorption des autres nutriments	20
4.4. Influence des nutriments sur l'absorption du nickel et sur le seuil toxique ...	20
4.5. Différences variétales de sensibilité au nickel du maïs.....	22

5. CONCLUSION.....	22
BIBLIOGRAPHIE.....	25
ANNEXES.....	27
Annexe 1 : Analyse physico-chimique de l'état initial du sol des deux essais en serre.....	29
Annexe 2 : Apports de solutions nutritives complètes et de NiSO ₄ lors des deux essais en serre	33
Annexe 3 : Résultats des analyses de variance de l'expérimentation 1 : influence du nickel sur développement du maïs.....	39
Annexe 4 : Résultats des analyses de variance de l'expérimentation 2 : influence du nickel sur l'absorption des éléments par le maïs.....	43
Annexe 5 : Résultats des analyses chimiques des expérimentations au laboratoire : influence des nutriments sur l'absorption du nickel par le maïs ...	47

DOCUMENTS ANTERIEURS

- L'HUILLIER L. et EDIGHOFFER Sylvie. 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 Sylvie. 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.

RESUME

Le nickel est toxique pour le maïs quand sa teneur dépasse 14 ppm dans les tiges et feuilles, pour des plants mesurant 75 cm (du sol à la dernière feuille dégainée).

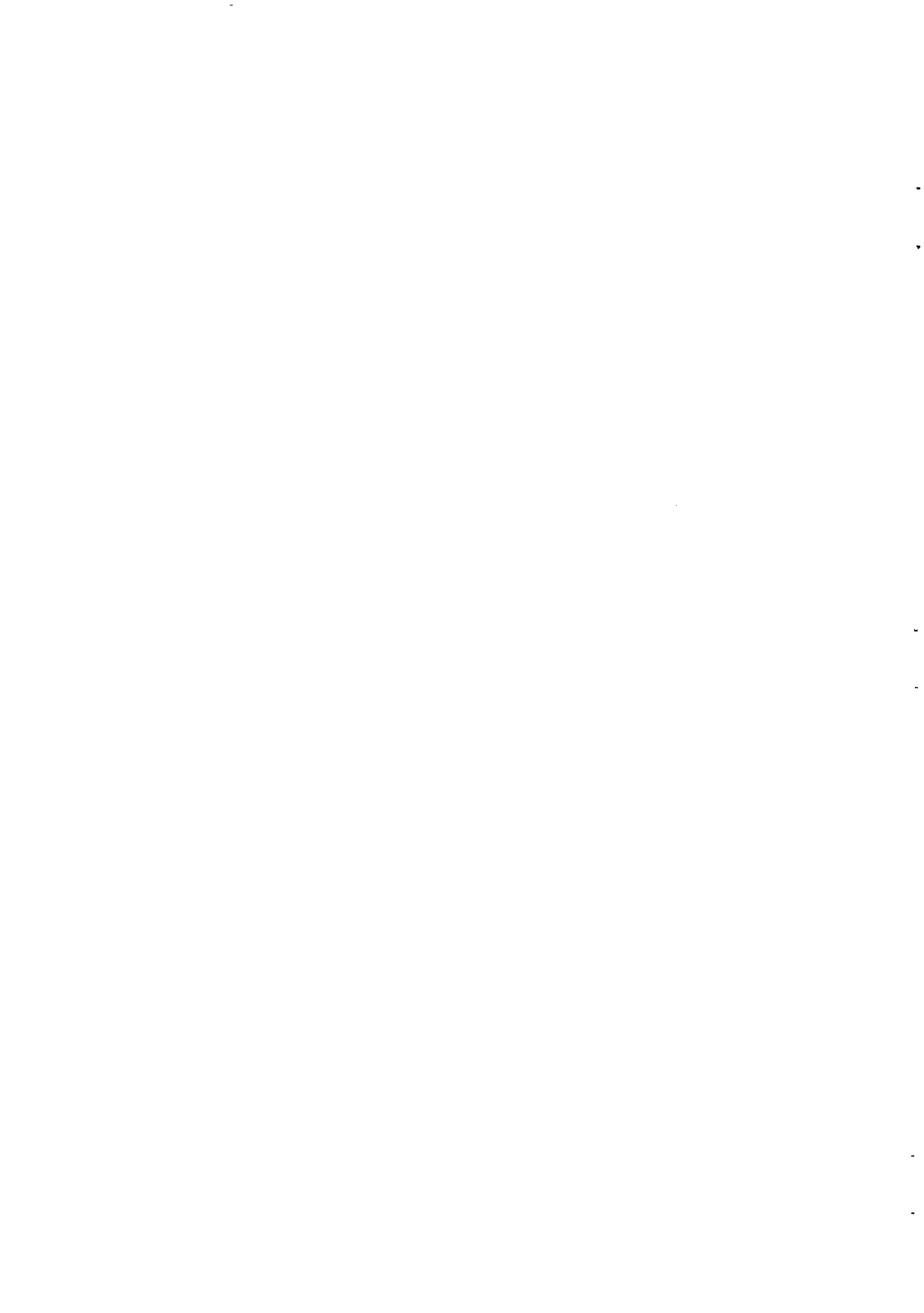
La toxicité du nickel se traduit en premier lieu par un ralentissement de la croissance, qui se poursuit par un mauvais développement des plants intoxiqués, entraînant de faibles rendements en grains en ce qui concerne le maïs (47,7 qx/ha pour la dose toxique de nickel de 125 mg/kg de sol, contre 82,8 qx/ha pour les témoins).

La phytotoxicité n'est pas due à une carence en un élément, même si l'augmentation de la teneur en nickel dans les tiges et feuilles induit une diminution des teneurs en fer et en manganèse.

L'absorption du nickel est fortement diminuée en présence d'autres éléments nutritifs dans la solution de culture. En effet, dans de l'eau pure, le nickel est toxique pour le maïs à partir de 3 $\mu\text{mole/l}$, alors que dans une solution nutritive complète, il est toxique à partir de 30 $\mu\text{mole/l}$. Ainsi, un apport de certains éléments nutritifs en quantités déterminées pourrait constituer un moyen de diminuer des problèmes de phytotoxicité.

Par ailleurs, nous avons constaté des différences de sensibilité au nickel importantes entre les variétés de maïs commercialisées à Nouméa ou testées par le CREA. La variété hycorn 80 semble ainsi la moins sensible des variétés testées, car la croissance de ses racines, dans une solution à 4 $\mu\text{mole/l}$ de nickel, n'est ralentie que de 65,2 % par rapport au témoin, alors que la variété XL 94 semble la plus sensible avec un ralentissement de la croissance racinaire de 93,8 %. Une autre voie d'adaptation des cultures à des sols ferrallitiques ferritiques à teneurs élevées en nickel pourrait donc être de sélectionner espèces et cultivars tolérants au nickel.

MOTS-CLES : Sol ferrallitique ferritique; Nickel ; Toxicité ; Maïs ; Variété ; Croissance ; Développement ; Nutrition.



1. INTRODUCTION

L'étude de l'influence des métaux lourds sur la croissance et le développement des plantes cultivées, engagée dans le cadre de la Convention Province Sud - ORSTOM pour l'étude des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie, est motivée par le fait que ces sols présentent souvent, les faciès ferritiques notamment, de fortes teneurs en éléments métalliques (Ni, Cr, Co et Mn).

Les résultats acquis en 1991 (rapport de convention n°13, 1992) ont permis de mettre en évidence la forte toxicité du nickel pour le maïs, puisque 30,8 ppm de Ni dans les tiges et feuilles de la plante suffisent à induire une baisse de son poids de matière sèche totale de 31,1 % par rapport au témoin. Par ailleurs, il a été montré que le principal effet toxique du nickel est de ralentir la croissance, sans induire apparemment de carence en un élément, et sans montrer de symptômes visuels particuliers (sauf à des teneurs en nickel dans les tiges et feuilles très élevées induisant des nécroses foliaires).

Les objectifs des travaux en serre et au laboratoire, dont les résultats sont rapportés ici, étaient les suivants :

1- déterminer l'influence de doses toxiques de nickel sur le développement complet du maïs. En effet, jusqu'à présent nous n'avons guère été au delà de 1 mois de végétation et il était essentiel de connaître les incidences du ralentissement de la croissance d'un plant intoxiqué sur son développement complet ;

2- préciser le seuil toxique du nickel pour le maïs et son influence sur l'absorption des autres éléments, en tenant compte de l'évolution normale des teneurs de ces éléments en fonction des stades de développement ;

3- caractériser, à l'aide de cultures hydroponiques, d'une part les différences éventuelles de sensibilité au nickel de différentes variétés de maïs, d'autre part l'influence des nutriments sur l'absorption du nickel.

2. MISE EN PLACE ET CONDUITE DES EXPERIMENTATIONS

Les deux premiers objectifs cités ci-dessus ont fait l'objet de deux essais en serre, que nous appellerons expérimentations 1 et 2, le troisième a fait l'objet d'expérimentations en laboratoire.

2.1. Expérimentations en serre 1 et 2 : influence du nickel sur le développement du maïs et sur l'absorption des éléments par le maïs

2.1.1. Choix et quantités de sol

Le même sol que celui ayant servi aux premiers essais en serre en 1991 a été utilisé. Il s'agit, pour mémoire, d'un sol peu évolué d'apport alluvial de la région de La Foa. Il contient 157 ppm de Ni total (cf. analyses du sol de l'essai en annexe 1), ce qui est faible en comparaison des teneurs en nickel de la plupart des autres sols du Territoire (Latham *et al.*, 1978).

Pour la première expérimentation, des vases de végétation de grande contenance ont été utilisés (8,94 litres) permettant de mener le maïs jusqu'à maturité. La quantité de sol par pot était de 11,5 kg. Pour la seconde expérimentation, des vases de 4,68 litres ont été utilisés, avec 6,2 kg de sol par pot.

2.1.2. Doses de nickel utilisées

Les doses de nickel appliquées, sous forme de sulfate ($\text{NiSO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$), ont été les suivantes :

<i>expérimentation 1</i>			<i>expérimentation 2</i>		
Doses	NiSO_4 (mg/kg de sol)	Ni correspondant (mg/kg de sol)	Doses	NiSO_4 (mg/kg de sol)	Ni correspondant (mg/kg de sol)
1	0	0	1	0	0
2	280	62,5	2	140	31,3
3	560	125,1	3	280	62,5
			4	420	93,8
			5	560	125,1

2.1.3. Type des expérimentations

Les deux expérimentations en serre étaient du type en blocs complets équilibrés à 6 répétitions, avec 2 pots par traitement élémentaire. La première comportait donc 36 pots, la seconde 60 pots.

2.1.4. Mise en place et conduite des expérimentations

La première expérimentation a été mise en place dans la serre du CREA à Nessadiou (celles de l'ORSTOM n'étant pas assez hautes), la seconde dans une serre de l'ORSTOM.

La technique de culture utilisée est celle du laboratoire d'Agropédologie. La variété de maïs utilisée est l'hybride double GH 5010.

L'apport de NiSO_4 a été fait sous forme solide par mélange direct avec le sol sec grâce à un mélangeur Chopin.

La même fumure minérale complète a été apportée à tous les pots de chaque expérimentation, en plusieurs fractions (cf. fumures en annexe 2). De plus, les différentes quantités d'ions sulfates, apportées par les différentes doses de NiSO_4 , ont été corrigées par des apports de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Les quantités d'azote apportées par $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ont été elles-mêmes corrigées par des apports de NH_4NO_3 (cf. annexe 2). Ainsi, les quantités d'azote et de sulfate étaient les mêmes pour tous les pots de chaque essai.

Au cours des expérimentations, différentes mesures ont été réalisées : hauteurs, évapotranspiration, nombre de feuilles, poids des plants et des grains à la récolte...

Dans le cas de la seconde expérimentation, les plants ont été récoltés à une hauteur déterminée (75 cm au niveau de la dernière feuille dégainée), afin de pouvoir comparer précisément les teneurs en éléments de plants ayant sensiblement les mêmes poids. La récolte s'est donc étalée sur plusieurs jours, étant donné le ralentissement de la croissance des plants intoxiqués par rapport aux témoins.

Lors des récoltes, divers échantillons de végétaux ont été constitués, ainsi que de percolats, pour être analysés par le Laboratoire Central d'Analyses du Centre. Par la suite, les résultats de ces analyses ont été traités statistiquement par un programme informatique du laboratoire.

Le tableau ci-dessous nous renseigne sur la nature et les dates des principales interventions réalisées en cours des expérimentations :

Interventions	dates	
	1 ^{er} essai	2 ^{ème} essai
Préparation des sols, avec mélange du NiSO ₄	20/7/92	11/5/92
Mise en place des pots dans la serre, mise à la capacité au champ des pots, et solubilisation du NiSO ₄	3/8/92	20/5/92
Application des fumures correctrices	14/8/92	28/5/92
Germination des grains à l'étuve	15/8/92	31/5/92
Semis	17/8/92	2/6/92
Apports de solution nutritives	semis tous les 14 jours	semis 10 ^{ème} jour 20 ^{ème} jour
Traitement insecticide avec du diméthoate (en alternance avec du parathion)	une fois par mois	12/6/92
Récolte	3/12/92	du 7/7 au 20/7/92

2.2. Expérimentations en laboratoire : différences variétales de sensibilité au nickel et influence des nutriments sur l'absorption du nickel par le maïs

La technique de culture utilisée pour ces expérimentations est ce que l'on appelle la "culture hydroponique". Les plants de maïs sont en effet cultivés directement sur des solutions contenant du sulfate de nickel.

L'avantage de ce type d'expérimentation est que l'élément est totalement disponible pour la plante et n'interagit pas avec le sol. De plus, sa durée est très courte. En effet, après quelques jours seulement, la mesure de la longueur des racines suffit pour mettre en évidence la concentration du métal en solution à partir de laquelle la toxicité apparaît.

2.2.1. Matériels et méthodes

Des graines de maïs sont mises à germer pendant environ deux jours, puis sont sélectionnées par la longueur de leur racine principale de façon homogène. Ainsi, la longueur des racines au départ de l'expérimentation est de 15 mm ± 2 mm.

Ces plantules prégermées sont coincées verticalement dans des trous de 7 mm de diamètre percés dans une plaque de polystyrène de 5 mm d'épaisseur.

Des plaques contenant chacune 12 plantules sont ainsi constituées. Chaque plaque est déposée dans une bassine en polyéthylène, à la surface d'une solution de culture aérée à l'aide d'un bulleur. Le volume des solutions est de 2 litres.

Les longueurs des racines sont mesurées régulièrement après mise en solution. A la récolte, les poids secs des tiges et feuilles et des racines, et éventuellement les teneurs en éléments, sont déterminés.

2.2.2. Les expérimentations

Deux expérimentations ont été menées :

1 - concernant les différences de sensibilité au nickel de différentes variétés de maïs, les variétés suivantes ont été testées : GH 5010 ; Hycorn 80 ; Hyc 80/Ex Hy 9 ; XL 77 A ; XL 80 ; XL 94 ; DK 529 ; DK 581 ; DK 747 ; DK 764. Les deux premières ont été achetées dans le commerce à Nouméa, les autres ont été aimablement données par le CREA.

Chaque variété a été cultivée dans une bassine contenant de l'eau permutée d'une part (témoins), et une bassine contenant une solution toxique de nickel d'autre part (4 μ mole/l, soit 1,05 mg/l de NiSO₄). Aucun élément nutritif n'a été ajouté ;

2 - concernant l'influence des autres nutriments sur l'absorption du nickel, le maïs hybride double GH 5010 fût cultivé dans des bassines avec différentes doses de nickel en solution, sans éléments nutritifs d'une part, avec éléments nutritifs d'autre part. Les doses de nickel dans les deux cas étaient les suivantes :

sans éléments nutritifs :

	DO	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
NiSO ₄ , 6H ₂ O (mg/l)	0	0,13	0,26	0,53	0,79	1,05	1,31	1,58	2,10	2,63
Ni (mg/l)	0	0,029	0,059	0,117	0,176	0,235	0,294	0,352	0,470	0,587
Ni (μ M)	0	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10

avec éléments nutritifs :

(composition de la solution (en mg/l) : K₃PO₄=38.25 ; Ca(NO₃)₂=62.5 ; Mg(NO₃)₂=138.2 ; FeSO₄=1.5 ; MnSO₄=1 ; H₃BO₃=0.55 ; CuSO₄=0.22 ; ZnSO₄=0.67 ; (NH₄)₆Mo₇O₂₄=0.04) :

	DO	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
NiSO ₄ , 6H ₂ O (mg/l)	0	0,66	1,31	2,63	5,26	7,88	10,52	15,77	21,03	26,29
Ni (mg/l)	0	0,147	0,294	0,587	1,174	1,761	2,348	3,523	4,697	5,871
Ni (μ M)	0	2,5	5	10	20	30	40	60	80	100

3. RESULTATS

Nous avons reporté en annexe les tableaux récapitulatifs des résultats des deux essais en serre et des expérimentations au laboratoire (cf. annexes 3, 4 et 5).

3.1. Expérimentation 1 : influence du nickel sur le développement du maïs

La figure 1 ci-contre représente l'évolution de la hauteur (du sol à la dernière feuille dégainée) des plants témoins et des plants intoxiqués par le nickel, tout au long de leur cycle complet de développement. On constate qu'à 28 jours de croissance, les plants intoxiqués sont déjà significativement plus petits que les témoins, mais qu'à la récolte (108^{ème} jour) ces différences ont disparu.

La figure 2 ci-contre montre les différences de poids frais des parties aériennes à la récolte. On constate que les plants intoxiqués sont significativement moins lourds que les plants témoins.

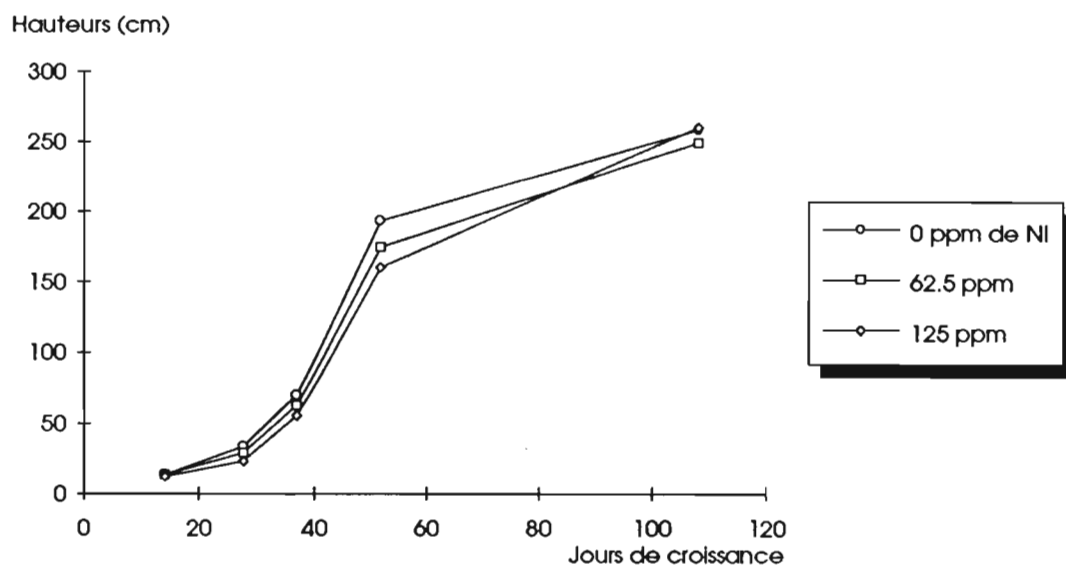


Fig. 1. Evolution de la hauteur (à la dernière feuilles dégainée) des plants témoins et des plants intoxiqués, au cours de leur cycle complet de développement.

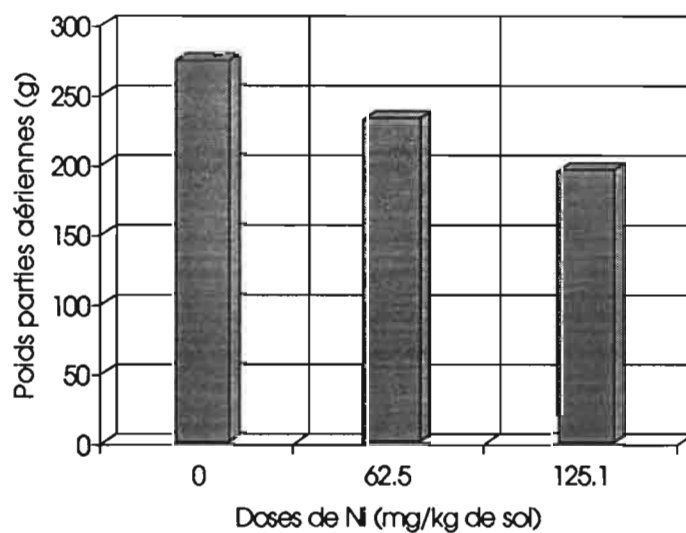


Fig. 2. Poids sec des parties aériennes à la récolte de la première expérimentation en fonction des doses de nickel.

La figure 3 et la photographie qui suivent montrent les effets des deux doses toxiques de nickel sur le rendement en grains à la récolte. Ainsi, le poids des grains par plant intoxiqué est nettement inférieur à celui des plants témoins. Cette différence de poids est surtout due à la différence du nombre de grains par épis. Mais le poids de 1000 grains semblerait lui aussi influencé par la teneur en nickel du sol.

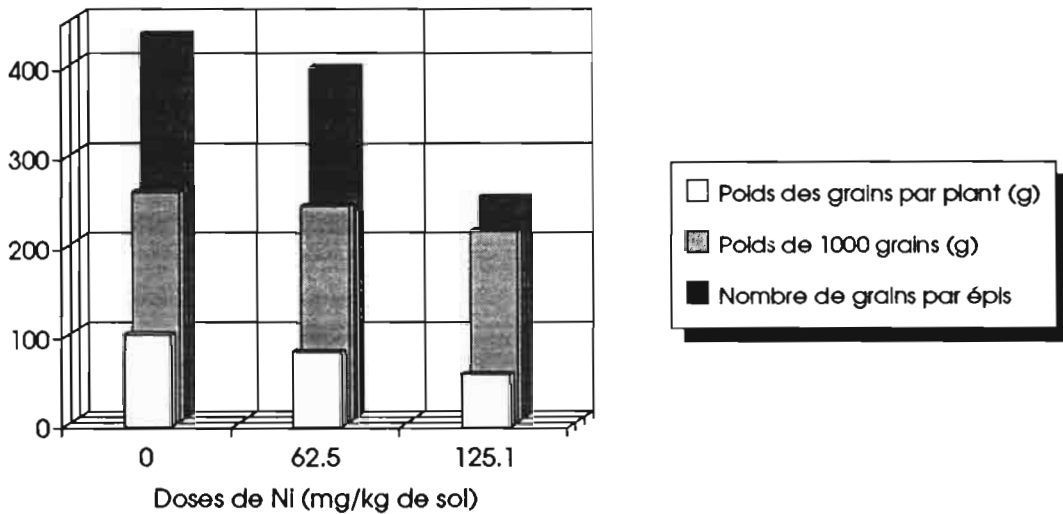


Fig. 3. Poids et nombre de grains par plant en fonction des doses de nickel, au cours de la première expérimentation.

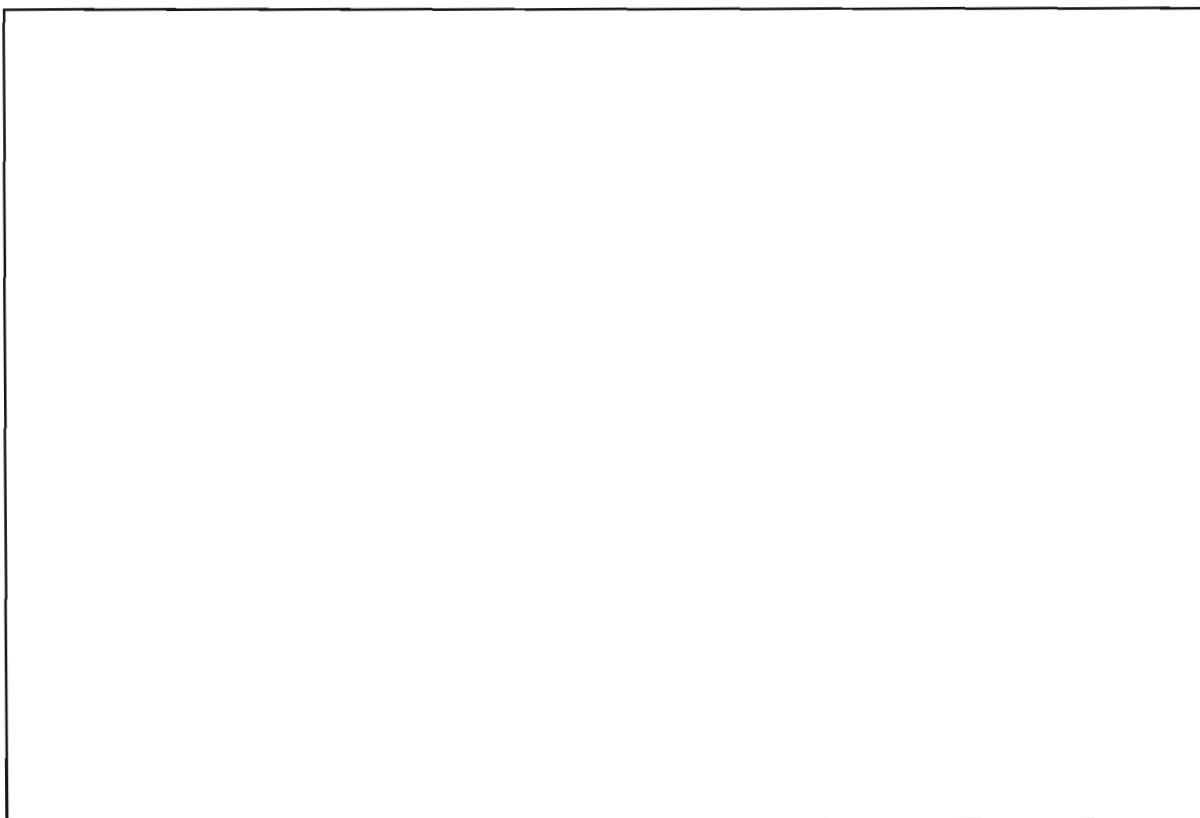


Photo 1. photographie des épis en fonction des doses de nickel.

3.2. Expérimentation 2 : seuil toxique du nickel et son influence sur l'absorption des éléments par le maïs

La figure 4 qui suit montre l'évolution de la croissance en hauteur des plants en fonction de la teneur en nickel dans le sol. On constate que la croissance est ralentie très significativement à partir de 93,8 ppm de nickel dès le 14ème jour de croissance, et à partir de 31,3 ppm dès le 20ème jour.

Le tableau 1 qui suit donne les teneurs en éléments dans les tiges et feuilles sèches des plants en fonction des différentes doses de nickel dans le sol. Les plants ont été récoltés à la même hauteur (75 cm du sol à la dernière feuille dégainée). Cela permet de comparer le plus justement possible les teneurs en éléments entre les plants. L'augmentation de la teneur en nickel dans les tiges et feuilles n'induit pas de variation significative en un élément, sauf pour le fer et le manganèse.

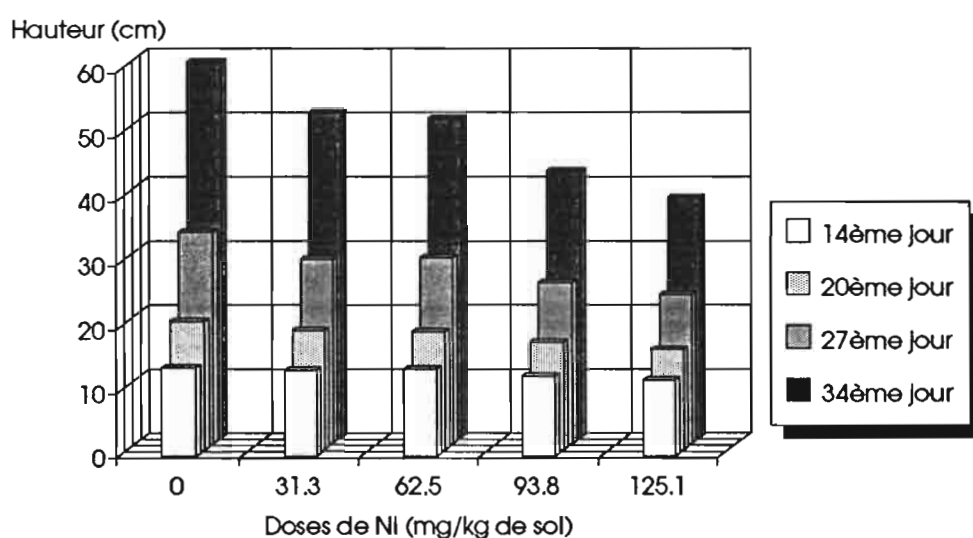


Fig. 4. Evolution de la hauteur des plants (à la dernière feuille dégainée) en fonction de la dose de nickel dans le sol, au cours de la deuxième expérimentation.

Tableau 1. Teneurs en éléments dans les tiges et feuilles sèches des plants mesurant 75 cm du sol à la dernière feuille dégainée

Paramètres	Doses de Ni (mg/kg de sol)					Probabilité du facteur Ni
	0	31,3	62,5	93,8	125	
Si (%)	1,84	1,92	1,73	1,71	1,67	0,6296
N (%)	2,15	2,21	2,12	1,77	1,85	0,9100
P (%)	0,22	0,24	0,22	0,18	0,19	0,8642
K (%)	2,84	3,06	2,79	2,54	2,66	0,8069
Ca (%)	0,29	0,33	0,29	0,27	0,30	0,6590
Mg (%)	0,43	0,42	0,38	0,33	0,39	0,9339
Fe (ppm)	93	90	92	73	75	0,9938
Mn (ppm)	37	31	33	32	26	0,9979
Ni (ppm)	3	13	14	19	27	0,9999

3.3. Expérimentations en laboratoire

3.3.1. Différences variétales de sensibilité au nickel du maïs

En cultivant différentes variétés de maïs dans de l'eau permutée d'une part (témoins), et dans des solutions de nickel à une concentration toxique (4 $\mu\text{mole/l}$) d'autre part, cela nous a permis de mettre en évidence des sensibilités au nickel différentes suivant la variété. Le tableau 2 qui suit nous en donne les résultats.

Tableau 2. Différences de croissance des racines des plants intoxiqués par rapport aux témoins, après 5 jours de croissance

Variété	Croissance racines témoins (cm)	Croissance racines intoxiquées (cm)	Différence de croissance (%)
GH 5010	31,9	8,2	74,4
Hycorn 80	22,4	7,8	65,2
Hyc 80/Ex Hy 9	18,7	4,0	78,4
XL 80	31,3	3,4	89,2
XL 94	17,7	1,1	93,8
XL 77 A	23,1	3,5	84,8
DK 529	20,7	3,4	83,8
DK 581	23,0	4,1	82,2
DK 747	25,7	4,5	82,5
DK 764	20,6	3,0	85,4

3.3.2. Influence des nutriments sur l'absorption du nickel par le maïs

Les figures 5 et 6 ci-contre nous donnent la croissance des racines en fonction des doses de nickel en solution, sans éléments nutritifs d'une part (figure 5), et avec éléments nutritifs d'autre part (figure 6).

Ainsi, on constate que sans éléments nutritifs en solution, le nickel est très toxique puisque la croissance des racines est fortement ralentie à partir de 3 $\mu\text{mole/l}$.

Avec éléments nutritifs en solution (cf. détail de la solution en page 12), le nickel est moins toxique puisque la croissance des racines est ralentie à partir de 30 $\mu\text{mole/l}$.

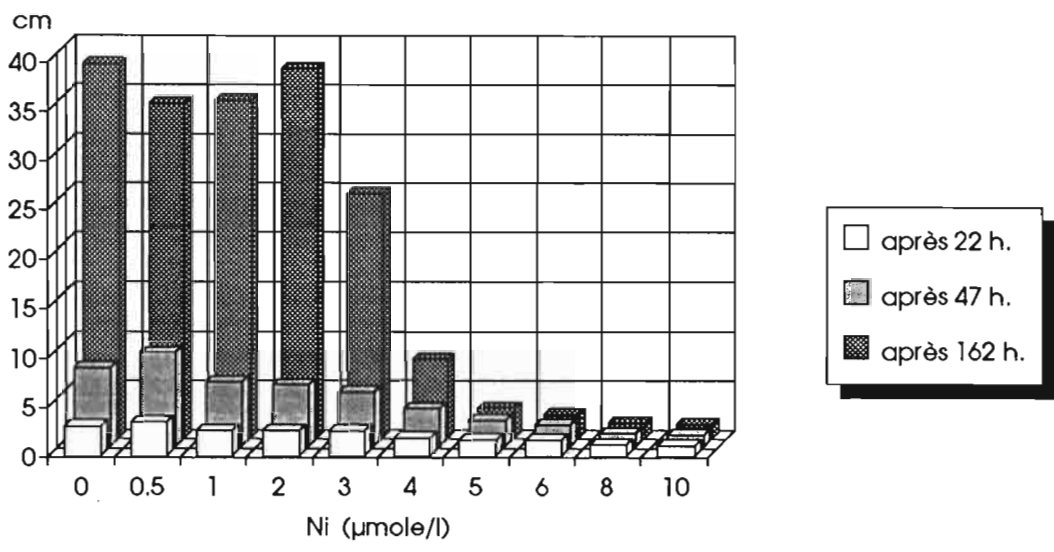


Fig. 5. Croissance des racines en fonction des doses de nickel en solution, **sans** éléments nutritifs, après différents temps de croissance.

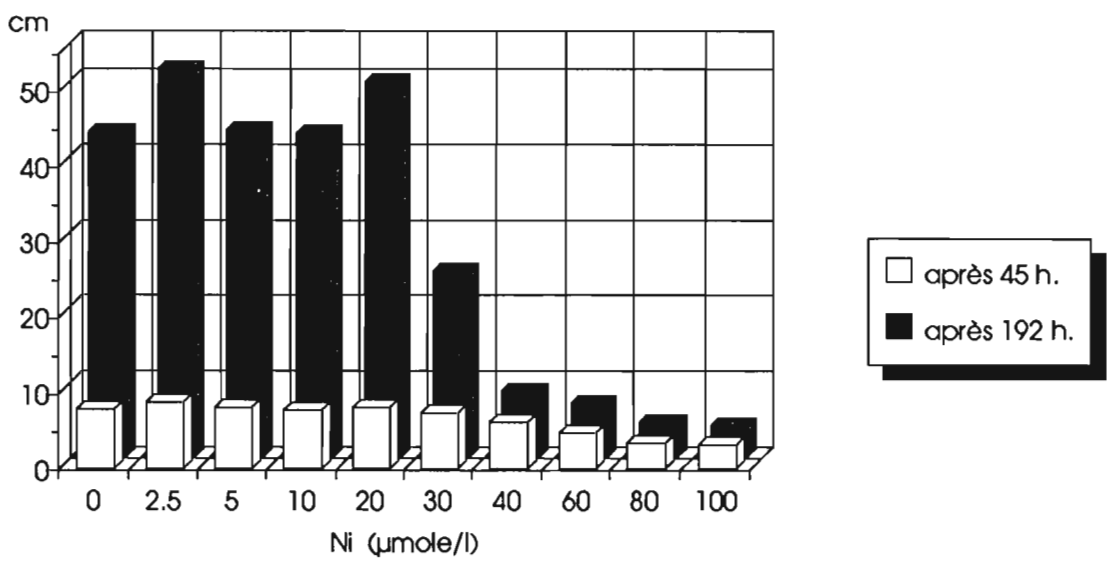


Fig. 6. Croissance des racines en fonction des doses de nickel en solution, **avec** éléments nutritifs, après différents temps de croissance.

4. DISCUSSION

4.1. Conséquences de l'intoxication par le nickel sur le développement du plant

Les figures 1 et 4 (pages 13 et 15) montrent une nouvelle fois (cf. rapport de convention n°13, 1992) que le premier symptôme qui apparaît lors d'une intoxication d'un plant par le nickel est le ralentissement de sa croissance (dès le 14^{ème} jour). Pourtant, les plants intoxiqués comblent finalement cette différence de hauteur qu'ils ont par rapport aux témoins, puisqu'à maturité il n'y a plus de différences significatives entre les plants à ce niveau (figure 1).

Toutefois, les plants intoxiqués accusent toujours une différence importante par rapport aux témoins au niveau des poids de leurs parties aériennes à la récolte (figure 2). Cette différence de poids, malgré des hauteurs semblables, est certainement due à des diamètres de tiges des plants intoxiqués inférieurs à ceux des témoins, ou à des surfaces foliaires plus faibles, ou encore à des densités plus faibles.

On pouvait penser, à partir du fait que les hauteurs sont semblables, que les rendements en grains des plants témoins et des plants intoxiqués seraient proches. Il n'en est rien, comme le montre la figure 3 (page 14) : les rendements en grains des plants intoxiqués sont très significativement inférieurs à ceux des plants témoins. Le problème vient surtout du nombre de grains par épis qui est très faible pour les plants intoxiqués (figure 3 et photographie 1, page 14). On peut supposer qu'un excès de nickel dans la plante empêche une bonne fécondation, ou une bonne nouaison finale. Mais, si l'on observe le poids de 1000 grains (annexe 3), on constate que les grains des plants intoxiqués semblent moins lourds, moins remplis que ceux des témoins. Il y aurait donc aussi un problème de transfert des sucres et des protéines à partir des feuilles et des tiges vers les grains.

Le tableau qui suit nous précise les rendements en grains pour les différentes doses de nickel :

	Doses de nickel (mg/kg de sol)		
	0	62,5	125,1
Poids de grains secs par plant (g/plt)	104,71	84,93	60,45
Poids de grains secs par hectare ¹ (qx/ha)	70	56,6	40,3
Rendement commercial (qx/ha)	82,8	67	47,7

4.2. Seuil toxique du nickel dans les tiges et feuilles du maïs

Etant donné l'évolution probable de la teneur en nickel dans les tiges et feuilles lorsque la taille des plants augmente, nous avons décidé de récolter des plants témoins et des plants intoxiqués de même hauteurs (75 cm du sol à la dernière feuille dégainée : expérimentation 2), afin de comparer au plus juste les teneurs en nickel de leurs tiges et feuilles à la récolte.

Ainsi, la figure 4 (page 15) montre que la dose 4 (93,8 ppm de nickel dans le sol) induit un ralentissement significatif de la croissance dès le 14^{ème} jour, et la dose 2 (31,3 ppm) à partir du 20^{ème} jour. Ce ralentissement de la croissance est particulièrement significatif au delà de la dose 3 (62,5 ppm de Ni dans le sol).

¹ Pour une densité de 66 666 pieds par hectare.

Cette dose de 62,5 ppm de nickel dans le sol a induit une teneur en nickel dans les tiges et feuilles de 14 ppm à la récolte (tableau 1, page 15). On peut donc dire que le nickel est toxique pour le maïs hybride double GH 5010, lorsque sa teneur dans les tiges et feuilles de plants mesurant 75 cm du sol à la dernière feuille dégainée est supérieure à 14 ppm.

L'observation des résultats d'expérimentations précédentes en plein champ, aux différences inter-variétales et de tailles près, montre que ce seuil est souvent dépassé : plus de 25 ppm sur certains plateaux des essais sur vertisols hypermagnésiens de la région de la Tamoia par exemple (sols contenant 0,3 % de Ni) (rapport n°10 de Bonzon *et al.*, 1991). Sur sol ferrallitique, les résultats acquis jusqu'à présent n'ont pas montré de dépassement de ce seuil, mais il s'agissait d'expérimentations en serre sur un sol ferrallitique ferritique de référence correspondant à une situation pédologique déterminée. Il faut encore attendre les résultats des expérimentations au champ devant débuter en 1993 sur le site de Ouénarou (rivière Bleue).

4.3. Influence du nickel sur l'absorption des autres nutriments

Nous savons que la croissance en hauteur des plants s'accompagne d'une diminution de la teneur de la plupart des éléments. Le fait de récolter les plants à la même hauteur, au cours de l'expérimentation 2, nous a permis de comparer au plus juste les teneurs en éléments des plants intoxiqués par le nickel avec celles des plants témoins, et de mettre en évidence précisément l'influence du nickel sur l'absorption des autres nutriments par le maïs.

Ainsi, les teneurs en éléments majeurs dans les tiges et feuilles ne varient pas significativement lorsque la teneur en nickel augmente (tableau 1, page 15). Seules les teneurs en manganèse et en fer diminuent de façon significative, sans toutefois atteindre des niveaux de carence (Taureau *et al.*, 1989).

Cela implique que l'effet toxique du nickel est un effet direct et non induit.

4.4. Influence des nutriments sur l'absorption du nickel et sur le seuil toxique

Comme le montrent les figures 7 et 8 ci-contre, l'absorption du nickel est très fortement diminuée par la présence d'autres éléments dans la solution de culture. Ainsi, dans les tiges et feuilles (figure 7), les teneurs en nickel sont 4 à 5 fois plus faibles quand les plantules sont cultivées dans une solution nutritive complète plutôt que dans une solution sans nutriments. Dans les racines (figure 8), les teneurs en nickel sont environ deux fois plus faibles en présence d'autres nutriments.

La conséquence essentielle de ces diminutions de l'absorption du nickel est l'augmentation du seuil de toxicité. En effet, sans éléments nutritifs, la croissance racinaire est ralentie à partir de 3 $\mu\text{mole/l}$ de Ni (figure 5, page 17), alors qu'en présence d'éléments nutritifs, elle est ralentie à partir de 30 $\mu\text{mole/l}$ de Ni (figure 6, page 17). La plante est donc en mesure de se développer normalement dans une solution dix fois plus concentrée en nickel.

On mesure là toute l'importance que peuvent jouer certains éléments sur la diminution de l'absorption du nickel, et par conséquent sur la diminution de la toxicité. La littérature indique que les éléments les plus aptes à diminuer l'absorption du nickel sont le magnésium et le calcium (Robertson, 1985; Heikal *et al.*, 1989). Ainsi, des apports judicieux des certains éléments nutritifs en quantités déterminées peuvent constituer un moyen de diminuer des problèmes de phytotoxicité dus au nickel.

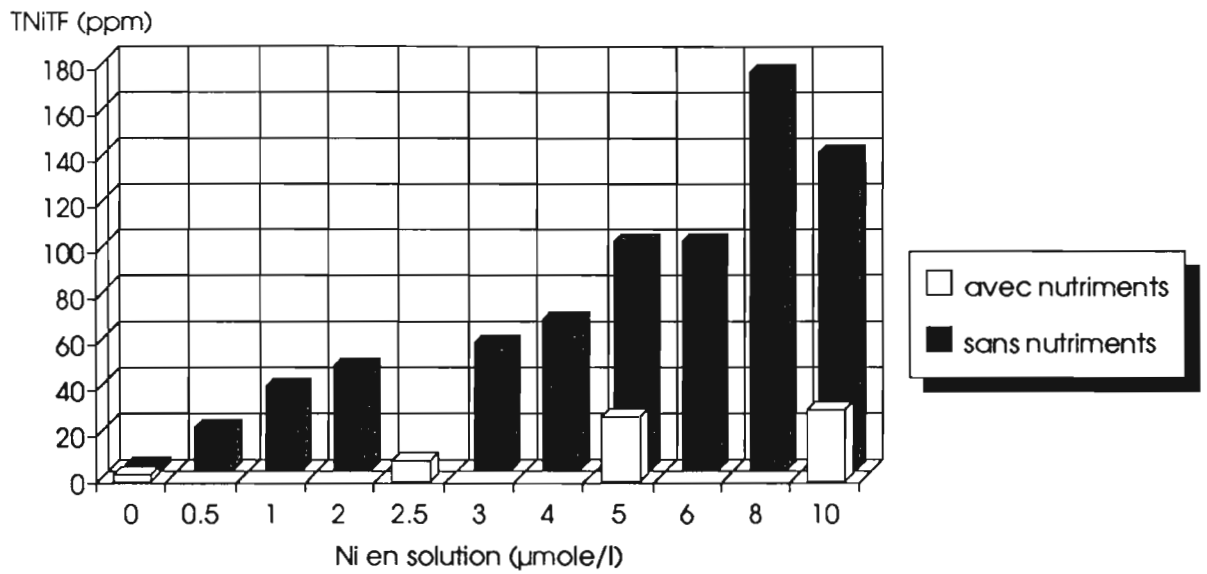


Fig. 7. Teneurs en nickel dans les tiges et feuilles de plantules cultivées avec et sans éléments nutritifs, en fonction de différentes doses de nickel dans la solution.

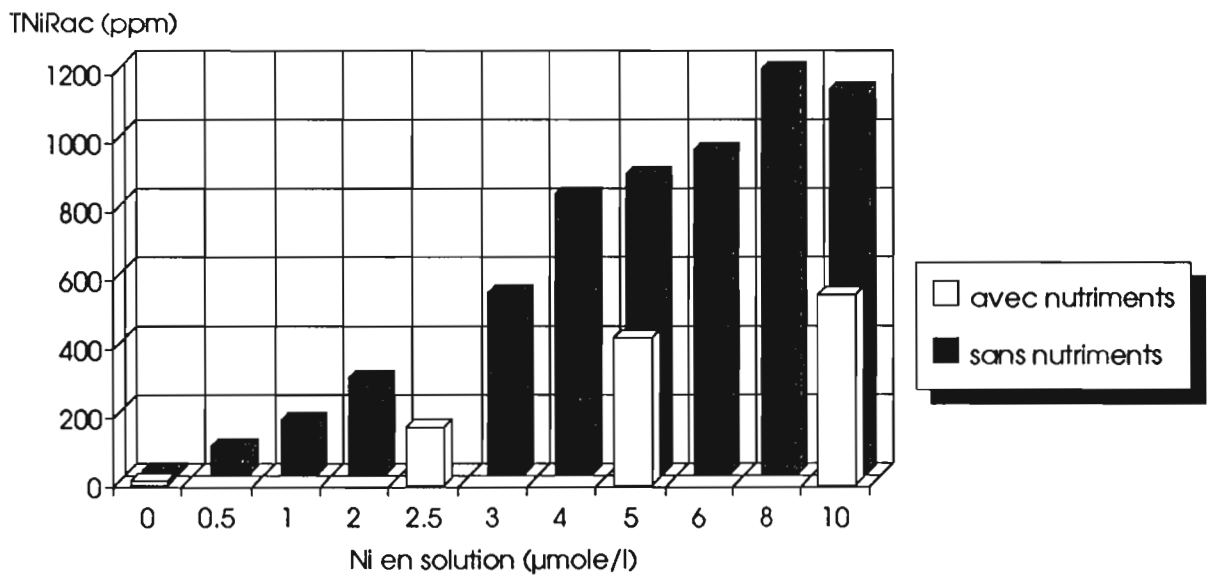


Fig. 8. Teneurs en nickel dans les racines de plantules cultivées avec et sans éléments nutritifs, en fonction de différentes doses de nickel dans la solution.

4.5. Différences variétales de sensibilité au nickel du maïs

Des différences de sensibilité au nickel importantes existent entre différentes variétés de maïs comme le montre le tableau 2 (page 16).

Ainsi, la variété hycorn 80 semble la moins sensible des variétés testées, avec une croissance de ses racines, dans une solution à 4 $\mu\text{mole/l}$ de nickel, ralentie de 65,2 % par rapport au témoin. En revanche, la variété XL 94 semble la plus sensible, avec un ralentissement de la croissance racinaire de 93,8 %.

De telles différences de sensibilité doivent exister parmi toutes les espèces végétales. Par conséquent, un moyen de s'adapter à des conditions toxiques pourrait consister à utiliser des variétés tolérantes au nickel. En outre, en plus du criblage inter-variétal qui paraît essentiel, un criblage inter-espèces pour choisir des espèces tolérantes au nickel et éliminer celles qui sont sensibles est tout aussi important.

5. CONCLUSION

Le nickel est donc toxique pour le maïs hybride double GH 5010 lorsque sa teneur dépasse 14 ppm dans les tiges et feuilles. Cette teneur correspond à des plants mesurant 75 cm du sol à la dernière feuille dégainée. En effet, nous ne connaissons pas encore la variation de la teneur en nickel dans la plante au cours de son développement. Ce seuil critique de 14 ppm est faible, et des résultats en plein champ ont montré qu'il est souvent dépassé. Les résultats obtenus à l'avenir sur les sols ferrallitiques du Sud devront désormais faire l'objet d'attentions particulières dans ce domaine.

Le premier effet toxique du nickel est un ralentissement de la croissance, qui se poursuit par un mauvais développement des plants intoxiqués, se traduisant par de faibles rendements en grains en ce qui concerne le maïs (47,7 qx/ha pour la dose toxique de nickel de 125 mg/kg de sol, contre 82,8 qx/ha pour les témoins). Il semble qu'un excès de nickel dans la plante empêche une bonne fécondation, ou une bonne nouaison, ou un bon transfert des sucres et des protéines vers les grains.

La toxicité n'induit pas de carence particulière en un élément. On ne peut donc pas la corriger en apportant à la plante un élément nutritif qui serait déficient.

Deux approches différentes sont possibles pour diminuer, voire éviter une toxicité :

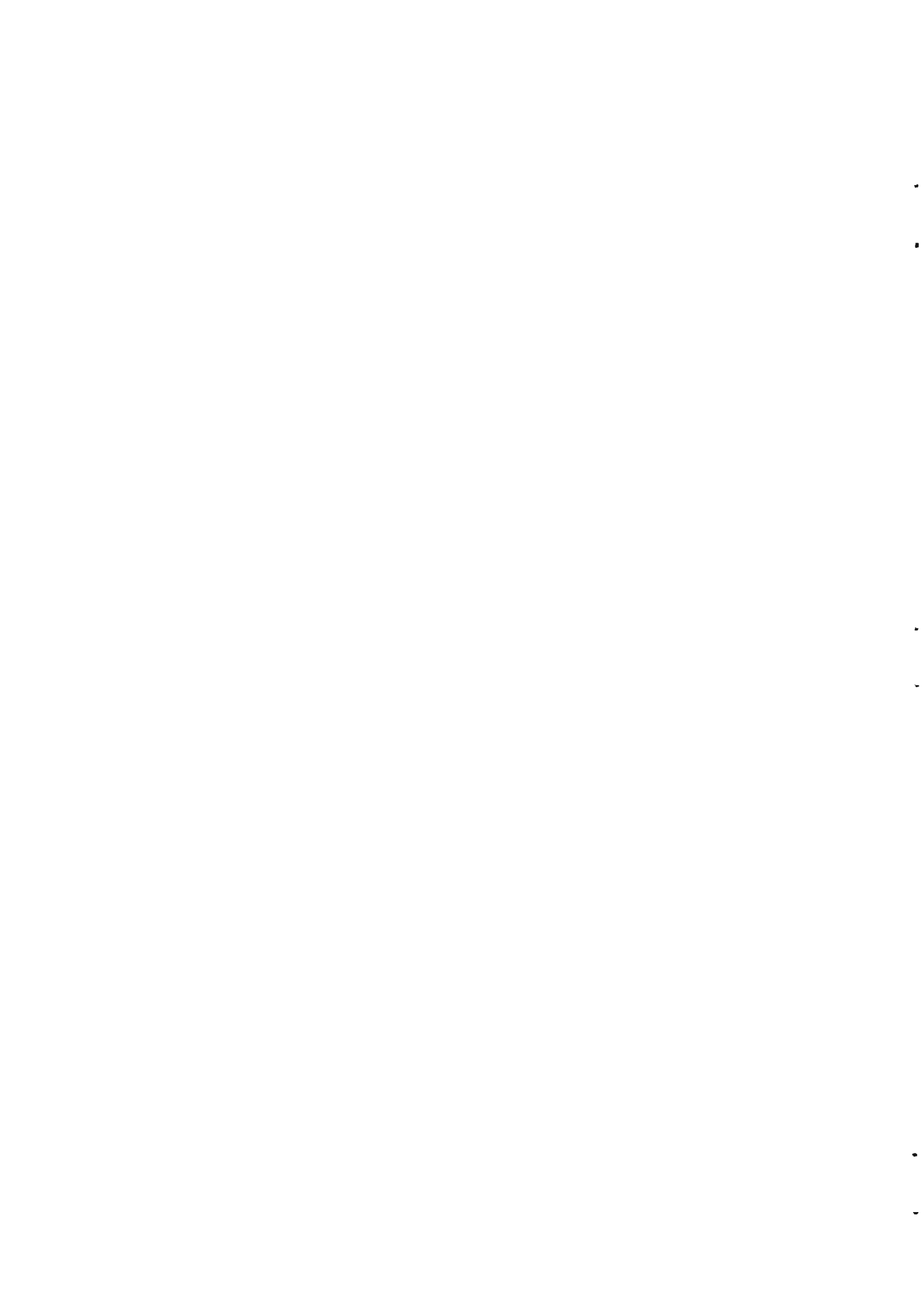
1- agir au niveau du sol. Nous avons constaté qu'un apport de certains éléments nutritifs - tels que Ca ou/et Mg - peut fortement diminuer l'absorption du nickel. En effet, dans de l'eau pure, le nickel est toxique pour le maïs à partir de 3 $\mu\text{mole/l}$, alors que dans une solution nutritive complète, il est toxique à partir de 30 $\mu\text{mole/l}$. Des apports judicieux des certains éléments nutritifs en quantités déterminées peuvent donc constituer un moyen de diminuer des problèmes de phytotoxicité dus au nickel. Nous savons aussi que l'apport de matière organique et la modification du pH du sol sont deux paramètres agissant de façon importante sur la biodisponibilité du nickel. Mais ils doivent encore faire l'objet d'études particulières ;

2 - agir au niveau de la plante. Un moyen de s'adapter à des sols ferrallitiques ayant des teneurs toxiques en nickel est de sélectionner des cultivars tolérants.

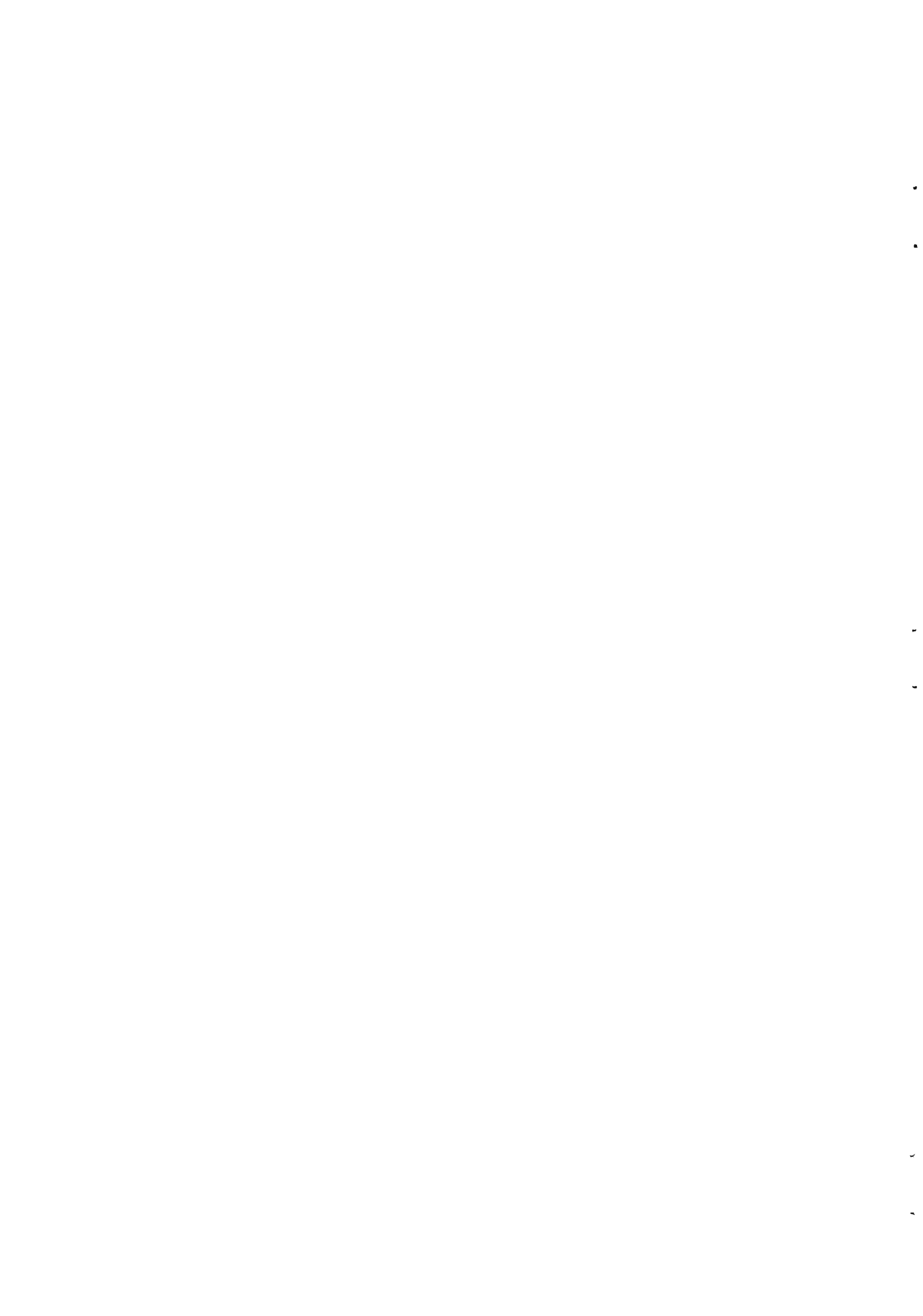
En effet, nous avons constaté des différences de sensibilité au nickel importantes entre des variétés de maïs : Hycorn 80 est la moins sensible des variétés testées, XL 94 la plus sensible. De telles différences de sensibilité existent certainement au sein d'autres espèces, et probablement davantage entre les espèces végétales. Il serait donc judicieux d'effectuer un criblage pour déterminer les espèces et les variétés plus ou moins tolérantes au nickel susceptibles d'être cultivées sur des zones à risques de toxicité élevés sur les sols ferrallitiques ferritiques du Sud.

BIBLIOGRAPHIE

- BONZON B., L. COLLET, C. BOUCARON, F. GOURDON, P. de MONTPEZAT et L. L'HUILLIER, 1991. Etude des effets des amendements calciques sur un vertisol-hypermagnésien. Résultats du cinquième cycle cultural de l'expérimentation au champ. Nouméa : ORSTOM. *Conv.; Sci. Vie; Agropédol.*, 10 : 74 p.
- HEIKAL, M.M.D., W.L. BERRY, A. WALLACE et D. HERMAN. Alleviation of nickel toxicity by calcium salinity. *Soil Science*, vol. 147, n°6, p.413-415.
- LATHAM M., P. QUANTIN et G. AUBERT. 1978. Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie, *Notice explicative N° 78*, ORSTOM Paris.
- LEPP N.W. (Ed.), 1981. *Effect of Heavy Metal Pollution On Plants. Vol. 1 : Effects Of Trace Metals On Plant Function*. Londres : Applied Sciences Publishers. 352 p.
- L'HUILLIER L. et EDIGHOFFER Sylvie, 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 Sylvie, 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.
- ROBERTSON A. I., 1985. The poisoning of roots of *Zea mays* by nickel ions, and the protection afforded by magnesium and calcium. *New Phytol.*, Vol. 100, p. 173-189.
- TAUREAU J.C., F. LAURENT et G. THEVENET, 1989. Diagnostic des carences sur blé, maïs et pois. *Perspectives Agricoles, ITCF*, supplément au n°132, janvier 1989.
- VERLIERE G. et R. HELLER, 1981. Effets du nickel sur la croissance de racines isolées de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit et caractères de son absorption. *Physiol. Vég.*, vol. 19, n°2, p.263-275.



ANNEXES

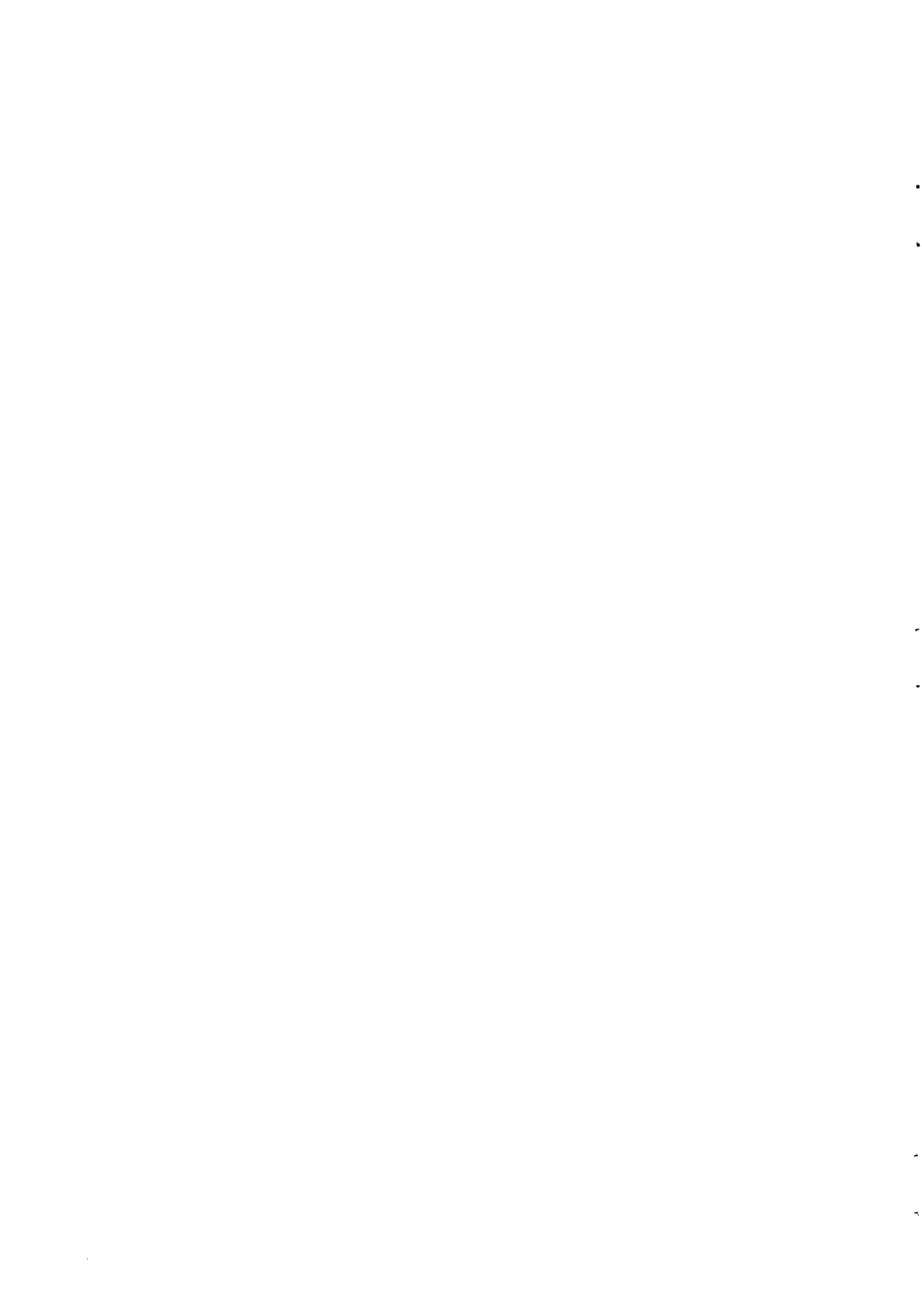


ANNEXE 1

ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ETAT INITIAL DU SOL DES DEUX ESSAIS EN SERRE

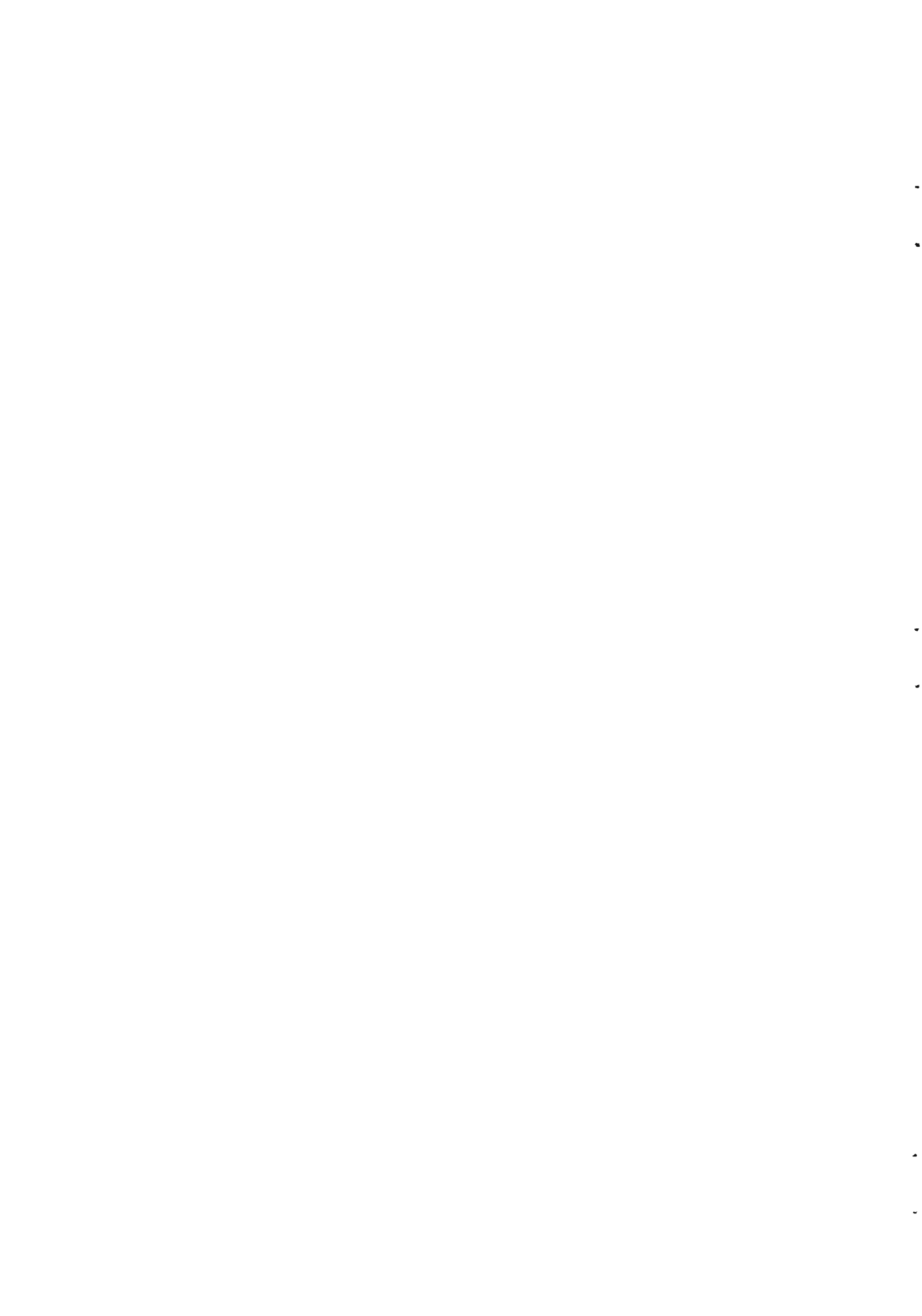
ANALYSE DE L'ETAT INITIAL DU SOL DES DEUX ESSAIS EN SERRE

ECHANTILLON	Sol alluvial
PROFONDEUR (cm)	0-25
TEXTURE (%)	
Argiles	12,7
Limons fins	13,7
Limons grossiers	11,2
Sables fins	39,2
Sables grossiers	22,1
Eléments grossiers	-
Matière organique totale	1,8
Somme	100,7
EAU DU SOL (%)	
pF2.5	17,6
pF3.0	14,7
pF4.2	9,5
pH	
pHeau	6,1
pHKCl	5,1
MATIERE ORGANIQUE (mg/g)	
Carbone	10,6
Azote	1,07
C/N	9,9
COMPLEXE D'ECHANGE (mécq/100g)	
Ca	8,53
Mg	7,35
K	0,32
Na	0,13
Somme des bases échangeables	16,35
Capacité d'échange	15,15
Taux de saturation (%)	107,90
BASES TOTALES (mécq/100g)	
Ca	39,17
Mg	80,99
K	6,96
Na	1,39
Somme des bases totales	128,51
P ₂ O ₅ (mg/g)	
Total	1,50
Assimilable	0,103
ELEMENTS TOTAUX (%)	
Perte au feu	5,69
Résidu	52,32
SiO ₂	21,26
Fe ₂ O ₃	7,20
Al ₂ O ₃	8,29
MnO ₂	0,13
TiO ₂	0,71
CaO	1,13
MgO	1,79
K ₂ O	0,73
Na ₂ O	0,07
NiO	0,02
Cr ₂ O ₃	0,03
CoO	0,01
CuO	0,05
NICKEL EXTRACTIBLE (DTPA) (ppm)	
NiE	10,7



ANNEXE 2

APPORTS DE SOLUTION NUTRITIVE COMPLÈTE ET DE NISO₄
LORS DES DEUX ESSAIS EN SERRE



EXPERIMENTATION 1 : INFLUENCE DU NICKEL SUR LE DEVELOPPEMENT DU MAÏS

SOLUTION NUTRITIVE POUR UN CYCLE COMPLET DU MAÏS CULTIVÉ EN SERRE SUR LE SOL D'ALLUVIONS DE LA FOA

Produits	Conc. des solutions (g/l)	Vol. des solutions (ml/pot) apporté au :		Quantités d'éléments apportées :									
		semis		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn	Mo
NH ₄ NO ₃	23,79	-	8*20 (ts les 15 j.)	1331,7									
K ₂ HPO ₄	9,10	20	8*20 (ts les 15 j.)		291,3	735,4							
KNO ₃	1,66	20	"	41,4		115,6							
Ca(NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	13,72	20	8*20 (ts les 15 j.)	292,8			419						
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	14,89	20	"	292,7				254,1					
H ₃ BO ₃	2,00	10	2*10 (ts les 45 j.)							10,50			
CuSO ₄ , 5H ₂ O	3,13	10	"						12,00		23,89		
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	2,40	10	"						8,10			16,38	
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 4H ₂ O	0,16	10	"	0,3									2,70
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot)				1958,9	291,3	851	419	254,1	20,10	10,50	23,89	16,38	2,70
Fertilisations équivalentes (kg/ha)				511	76	222	109,3	66,3	5,24	2,74	6,23	4,27	0,70

Remarques :

1. Les quantités de nutriments, exprimées en kg/ha, correspondent aux réserves maximales du sol utilisées par la plante entière pour réaliser une production de grain sec de 15,66 t/ha dans le cas de l'hybride double de maïs haut producteur XL 399. Ces réserves ont été estimées à partir des exportations d'éléments par les parties aériennes de la plante, les exportations d'éléments par les racines étant estimées au dixième des exportations des parties aériennes.
2. Les quantités de nutriments, exprimées en mg/pot, dérivent des précédentes en considérant que la quantité de sol exploitée est de 3000 tonnes à l'hectare, et que la quantité de sol contenue dans les pots utilisés est de 11,5 kg.
3. S'agissant de l'azote, un coefficient d'utilisation de 0,6 a été appliqué à l'exportation en cet élément par la plante entière - 414 kg/ha - pour rendre compte des réserves du sol effectivement nécessaires.

APPORTS DE NiSO₄

Quantités de NiSO ₄ apportées (g/pot)			Quantités d'éléments apportés à chaque pot					
D0	D1	D2	Ni			S		
0	3,22	6,44	D0	D1	D2	D0	D1	D2
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot)			0	719,35	1438,7	0	392,84	785,68
Fertilisations équivalentes (kg/ha)			0	187,7	375,3	0	102,5	205,0

FUMURES CORRECTRICES

Produit	Concentration de la solution (g/l)			Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot au semis					
	S0	S1	S2	N			S		
(NH ₄) ₂ SO ₄	64,77	32,39	0	D0	D1	D2	D0	D1	D2
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot)				686,24	343,12	0	785,68	392,84	0
Fertilisations équivalentes (kg/ha)				179,0	89,5	0	205,0	102,5	0

Produit	Concentration de la solution (g/l)			Quantité d'azote apporté par 50 ml appliqués à chaque pot au semis		
	S0	S1	S2	D0	D1	D2
NH ₄ NO ₃	0	19,62	39,24	D0	D1	D2
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot)				0	343,12	686,24
Fertilisations équivalentes (kg/ha)				0	89,5	179,0

Bilan azoté et soufre :

$$N = 1958,76 + 686,24 = 2645 \text{ mg/pot} = 690 \text{ kg/ha}$$

$$S = 13,7 + 785,68 = 799,38 \text{ mg/pot} = 208,5 \text{ kg/ha}$$

EXPERIMENTATION 2 : INFLUENCE DU NICKEL SUR L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS PAR LE MAÏS

SOLUTION NUTRITIVE COMPLETE POUR UNE CULTURE DE MAÏS SUR LE SOL D'ALLUVIONS DE LA FOA

Produits	Concentrations des solutions (g/l)	Volumes des solutions en ml apporté par pot au :			Quantités d'éléments apportées en mg par pot de 4,68 litres :									
		semis	10 ^e j.	20 ^e j.	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn	Mo
NH ₄ NO ₃	7,05	-	20	20	98,7									
K ₂ HPO ₄	13,34	20	20	20		142,3	359,2							
KNO ₃	2,43	20	20	20	20,2		56,4							
Ca(NO ₃) ₂ , 4H ₂ O	40,19	10	10	10	143			204,6						
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	43,64	10	10	10	143				124,1					
H ₃ BO ₃	2,00	10	-	-							3,50			
CuSO ₄ , 5H ₂ O	3,13	10	-	-						4,0		7,97		
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	2,40	10	-	-						2,7			5,46	
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 4H ₂ O	0,16	10	-	-	0,1									0,90
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot de 4,68 l.)					405	142,3	415,6	204,6	124,1	6,7	3,50	7,97	5,46	0,90
Fertilisations équivalentes (kg/ha)					216,4	76	222	109,3	66,3	3,6	2,10	4,26	2,92	0,48

Remarques :

1. Les quantités de nutriments, exprimées en kg/ha, correspondent aux réserves maximales du sol utilisées par la plante entière pour réaliser une production de grain sec de 15,66 t/ha dans le cas de l'hybride double de maïs haut producteur XL 399. Ces réserves ont été estimées à partir des exportations d'éléments par les parties aériennes de la plante, les exportations d'éléments par les racines étant estimées au dixième des exportations des parties aériennes.
2. Les quantités de nutriments, exprimées en mg/pot, dérivent des précédentes en considérant que le volume de sol exploité est de 2,5.10⁶ litres à l'hectare, et que le volume de sol contenu dans les pots utilisés est de 4,68 litres.

APPORTS DE NiSO₄

Produit	Concentration de la solution (g/l)					Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot 8 jours avant le semis									
	S0	S1	S2	S3	S4	Ni					S				
NiSO ₄ , 6H ₂ O	0	17,36	34,72	52,08	69,44	D0	D1	D2	D3	D4	D0	D1	D2	D3	D4
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot de 4,68)						0	193,93	387,86	581,79	775,71	0	105,90	211,79	317,69	423,58
Fertilisations équivalentes (kg/ha)						0	103,6	207,2	310,8	414,4	0	56,57	113,14	169,71	226,28

FUMURES CORRECTRICES

Produit	Concentration de la solution (g/l)					Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot au semis									
	S0	S1	S2	S3	S4	N					S				
(NH ₄) ₂ SO ₄	34,92	26,19	17,46	8,73	0	D0	D1	D2	D3	D4	D0	D1	D2	D3	D4
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot de 4,68)						369,98	277,48	184,99	92,49	0	423,58	317,69	211,79	105,90	0
Fertilisations équivalentes (kg/ha)						197,63	148,23	98,82	49,41	0	226,28	169,71	113,14	56,57	0

Produit	Concentration de la solution (g/l)					Quantité d'azote apporté par 50 ml appliqués à chaque pot au semis				
	S0	S1	S2	S3	S4	D0	D1	D2	D3	D4
NH ₄ NO ₃	0	5,29	10,58	15,86	21,15	D0	D1	D2	D3	D4
Quantités totales d'éléments apportées (mg/pot de 4,68)						0	92,49	184,99	277,48	369,98
Fertilisations équivalentes (kg/ha)						0	49,41	98,81	148,22	197,63

Bilan azoté et soufré :

$$N = 405 + 369,98 = 775 \text{ mg/pot} = 414 \text{ kg/ha}$$

$$S = 6,7 + 423,58 = 430,28 \text{ mg/pot} = 229,85 \text{ kg/ha}$$

ANNEXE 3

RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'EXPERIMENTATION 1 : INFLUENCE DU NICKEL SUR LE DEVELOPPEMENT DU MAÏS

Tableau 3.1. Résultats des analyses de variance de l'expérimentation 1

Paramètres	Unités	Moyennes générales	C.V. (%)	Probabilité du facteur Ni	Effets des doses croissantes de nickel (mg/kg de sol)			Comparaison des traitements
					0	62,5	125,1	
H14	cm	13,11	4,58	0,9989	13,71	13,63	11,98	1=2>3
H28	cm	28,52	5,28	1,0000	33,46	29,13	22,96	1>2>3
H37	cm	62,67	9,92	0,9924	70,01	62,65	55,36	1=2>3
H52	cm	176,47	13,71	0,8928	193,70	174,97	160,72	
H108	cm	255,98	4,41	0,7597	258,38	249,23	260,32	
ETP66	ml/j	889,44	21,58	0,9586	1056,17	885,67	726,5	1=2>3
HT108	cm	306,35	3,99	0,4797	310,59	301,69	306,77	
PPAf108	g	475,40	15,97	0,9780	542,40	487,83	395,97	1=2>3
PG	g/plt	83,36	28,13	0,9742	104,71	84,93	60,45	1>3
NGE	nb/plt	353,83	37,94	0,9088	426,50	389,75	245,25	
GRU	g/1000gr	237,48	16,43	0,8006	257,08	241,59	213,78	

Définition des paramètres

Paramètres	Définitions
Hn	Hauteur du sol à la dernière feuille dégainée, au même jour
HT108	Hauteur totale au 108ème jour (récolte)
ETP66	Evapotranspiration potentielle au 66ème jour
PPAf108	Poids frais des parties aériennes à la récolte
PG	Poids de grains secs par plant
NGE	Nombre de grains par épis
GRU	Poids de 1000 grains

ANNEXE 4

RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'EXPERIMENTATION 2 :
INFLUENCE DU NICKEL SUR L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS PAR LE MAÏS

Tableau 4.1. Résultats des analyses de variance de l'expérimentation 2

Paramètres	Unités	Moyennes générales	C.V. (%)	Probabilité du facteur Ni	Effets des doses croissantes de nickel (mg/kg de sol)					Comparaison des traitements
					0	31,3	62,5	93,8	125,1	
H14	cm	13.14	4.27	0.9999	13.93	13.5	13.7	12.57	12.01	1=3=2>4=5
H20	cm	18.00	3.50	1.0000	20.16	18.65	18.51	16.90	15.78	1>2=3>4>5
H27	cm	27.89	7.05	1.0000	33.10	28.81	29.08	25.20	23.26	1>3=2>4=5
H34	cm	47.65	9.61	1.0000	58.62	50.65	49.80	41.68	37.50	1>2=3>4=5
NJ75	jours	41.73	4.60	0.9799	38.43	40.35	40.55	44.10	45.22	5=4>3=2=1
TCdTF	%	9.08	12.55	0.7853	9.25	9.93	9.08	8.38	8.73	
TSiTF	%	1.77	13.57	0.6296	1.84	1.92	1.72	1.71	1.67	
TNTF	%	2.02	15.52	0.9100	2.15	2.21	2.12	1.77	1.84	
TPTF	%	0.21	19.45	0.8642	0.22	0.24	0.22	0.18	0.19	
TKTF	%	2.77	13.36	0.8069	2.83	3.06	2.79	2.54	2.66	
TCaTF	%	0.29	15.93	0.6590	0.29	0.32	0.29	0.26	0.29	
TMgTF	%	0.38	15.56	0.9339	0.43	0.42	0.37	0.33	0.39	
TNaTF	ppm	31.00	17.57	0.4161	28.33	33.33	31.66	30.00	31.66	
TFeTF	ppm	84.63	12.68	0.9938	93.00	90.16	92.00	73.33	74.66	1=3=2>5=4
TAITF	ppm	14.33	25.62	0.9414	16.66	15.00	16.33	10.83	12.83	
TMnTF	ppm	31.80	11.81	0.9979	36.66	31.00	33.16	32.16	26.00	1=3=4=2>5
TNiTF	ppm	15.07	37.98	0.9999	2.67	13.50	13.67	18.67	26.83	5>4=3=2>1
TCoTF	ppm	1.80	15.71	0.9254	1.83	2.00	1.83	1.83	1.50	
TCuTF	ppm	4.20	15.49	0.8418	4.50	4.67	4.00	3.83	4.00	
TZnTF	ppm	28.50	15.90	0.8628	26.00	29.17	31.67	25.67	30.00	
PTFf	g	334.95	10.45	0.4830	337.72	352.70	329.43	337.96	316.94	
HT	cm	177.29	3.22	0.6600	178.33	177.63	177.66	179.83	173.00	

Définition des paramètres

Paramètres	Définitions
Hn	Hauteur du sol à la dernière feuille dégainée, au même jour
NJ75	Nombre de jours de croissance pour atteindre 75 cm
TCdTF	Teneur en cendres dans les tiges et feuilles
TXTF	Teneur en élément X dans les tiges et feuilles
PTFf	Poids frais des tiges et feuilles à la récolte
HT	Hauteur totale à la récolte

ANNEXE 5

RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DES EXPÉRIMENTATIONS

EN LABORATOIRE :

INFLUENCE DES NUTRIMENTS SUR L'ABSORPTION DU NICKEL PAR LE MAÏS

Tableau 5.1. Résultats des analyses végétales des plantules¹ cultivées dans des solutions de nickel sans éléments nutritifs.

	Doses de Ni (μM)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)
Parties aériennes	0	0,99	1,72	0,05	0,42	0,006	103	27	2	2	1
	0,5	0,86	1,43	0,04	0,35	0,003	97	23	18	2	1
	1	0,94	1,62	0,04	0,35	0,004	106	22	36	2	1
	2	0,97	1,59	0,06	0,40	0,004	110	26	45	2	1
	3	0,86	1,37	0,10	0,37	0,007	83	24	55	2	1
	4	0,75	1,20	0,14	0,22	0,004	74	16	65	2	1
	5	0,78	1,37	0,18	0,19	0,005	72	15	99	2	1
	6	0,76	1,42	0,09	0,18	0,005	73	12	99	2	1
	8	0,78	1,43	0,09	0,19	0,005	75	13	173	3	1
	10	0,79	1,47	0,09	0,19	0,006	87	13	138	3	1
Racines	0	0,56	0,93	0,03	0,14	0,09	82	9	8	2	1
	0,5	0,52	0,86	0,02	0,13	0,07	50	10	79	2	1
	1	0,57	0,99	0,02	0,13	0,05	84	10	155	2	1
	2	0,58	1,08	0,02	0,12	0,07	63	14	279	2	1
	3	0,55	1,01	0,09	0,14	0,06	59	10	524	2	1
	4	0,63	1,22	0,15	0,27	0,05	55	13	810	2	1
	5	0,71	1,46	0,22	0,25	0,02	62	12	870	2	1
	6	0,76	1,52	0,16	0,26	0,02	69	9	939	2	1
	8	0,76	1,55	0,12	0,23	0,01	51	8	1175	2	1
	10	0,71	1,49	0,21	0,21	0,02	80	8	1115	3	1

Tableau 5.2. Résultats des analyses végétales des plantules¹ cultivées dans des solutions de nickel avec éléments nutritifs.

	Doses de Ni (μM)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)
Parties aériennes	0	0,71	2,31	0,64	0,84	0,007	80	118	3	2	1
	2,5	0,69	2,10	0,60	0,79	0,005	85	98	9	2	1
	5	0,76	2,36	0,59	0,81	0,005	68	107	28	3	1
	10	0,74	2,07	0,56	0,75	0,006	118	87	31	3	1
	20	0,74	2,04	0,52	0,71	0,005	59	86	154	2	1
	30	0,72	2,72	0,44	0,65	0,008	79	74	393	2	2
	40	0,69	2,71	0,32	0,49	0,012	85	61	444	2	1
	60	0,70	2,86	0,33	0,51	0,019	118	98	803	3	1
	80	0,71	2,13	0,19	0,36	0,008	81	60	679	2	1
	100	0,72	1,98	0,10	0,28	0,005	100	46	609	3	1
Racines	0	0,39	1,21	0,32	1,10	0,14	83	333	13	3	1
	2,5	0,38	1,14	0,32	1,14	0,09	68	245	169	3	1
	5	0,46	1,23	0,29	1,07	0,10	63	285	430	2	1
	10	0,51	1,22	0,38	0,96	0,14	52	162	554	2	1
	20	0,62	1,45	0,27	0,76	0,11	57	245	1159	3	1
	30	0,74	2,05	0,27	0,90	0,10	110	240	1985	2	1
	40	0,82	1,95	0,23	0,84	0,05	76	231	2503	2	1
	60	1,05	3,01	0,16	0,47	0,09	72	261	1995	3	1
	80	1,24	2,92	0,11	0,43	0,05	72	143	1933	3	1
	100	1,10	2,68	0,13	0,40	0,05	72	130	1790	3	1

¹ Analyses effectuées sur des échantillons moyens. Une analyse de variance n'est donc pas possible.

