

CONVENTIONS

SCIENCES DE LA VIE

AGROPEDOLOGIE

N° 13

1992

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

Etude des effets de doses croissantes de sulfate
de nickel sur la croissance, le développement
et la nutrition du maïs

Laurent L'HUILLIER
Sylvie EDIGHOFFER

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

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

CENTRE DE NOUMÉA

ORSTOM

CONVENTIONS

SCIENCES DE LA VIE

AGROPEDOLOGIE

N° 13

1992

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

Etude des effets de doses croissantes de sulfate
de nickel sur la croissance, le développement
et la nutrition du maïs

Laurent L'HUILLIER
Sylvie EDIGHOFFER

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

ORSTOM

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

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1992

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

Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle Calédonie.
Etude des effets de doses croissantes de sulfate de nickel sur la croissance, le développement et la nutrition du maïs

Nouméa :ORSTOM. Mai 1992, 84 p.
Conv. : *Sci. Vie : Agropédol.* ; 13

Ø76AGROØ5

AGRONOMIE ; ETUDE EXPERIMENTALE ; FERTILISATION DU SOL ; CEREALE ; ZEA MAYS ;
SERRE ; TOXICITE ; NICKEL ; SYMPTOME / NOUVELLE CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
de Nouméa
Mai 1992



AVERTISSEMENT

Ce rapport rend compte des résultats obtenus en 1991 sur deux expérimentations en serre concernant les effets de doses croissantes de sulfate de nickel sur la croissance et le développement 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 1 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 :

- 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 ESSAIS..... | 9 |
| 2.1. Choix du sol | 9 |
| 2.2. Le facteur étudié | 10 |
| 2.3. Type et plan de l'expérimentation | 10 |
| 2.4. Mise en place et conduite de l'expérimentation | 11 |
| 3. RESULTATS DES OBSERVATIONS ET DES MESURES..... | 12 |
| 3.1. Modifications morphologiques..... | 12 |
| 3.2. Influence sur la croissance | 12 |
| 3.3. Influence sur les teneurs des différents éléments dans les tiges et feuilles..... | 16 |
| 3.4. Influence sur les percolats..... | 16 |
| 3.5. Influence sur le sol | 19 |
| 4. DISCUSSIONS | 19 |
| 4.1. Remarques initiales..... | 19 |
| 4.2. Modalités d'actions sur le sol | 21 |
| 4.2.1. Estimation de la quantité de nickel assimilable par la plante | 21 |
| 4.2.2. Teneurs toxiques du nickel dans le sol | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3. Modalités d'actions sur les percolats | 23 |
| 4.3.1. <i>Interprétation des effets observés</i> | 23 |
| 4.3.2. <i>Teneurs toxiques du nickel dans les percolats</i> | 25 |
| 4.3.3. <i>Comparaison des conditions en serre avec celles au champ</i> | 26 |
| 4.4. Modalités d'actions sur la croissance..... | 27 |
| 4.5. Modalités d'actions sur les teneurs et les immobilisations en éléments dans les tiges et feuilles sèches | 28 |
| 4.5.1. <i>Interprétation des effets observés</i> | 28 |
| 4.5.2. <i>Teneurs toxiques du nickel dans les tiges et feuilles sèches</i> | 31 |
| 4.6. Bilan | 32 |
| 4.7. Comparaison avec la bibliographie | 33 |
| 5. CONCLUSION..... | 33 |
| BIBLIOGRAPHIE | 37 |
| ANNEXES | 39 |
| Annexe 1 : <i>Etude de la fixation du nickel sur le sol alluvial de l'essai</i> | 41 |
| Annexe 2 : <i>Analyse physico-chimique de l'état initial du sol de l'essai.....</i> | 45 |
| Annexe 3 : <i>Coupe schématique d'un vase de végétation</i> | 49 |
| Annexe 4 : <i>Apports de solution nutritive complète et de NiSO₄ lors du premier essai et lors du deuxième essai</i> | 53 |
| Annexe 5 : <i>Données Climatiques.....</i> | 63 |
| Annexe 6 : <i>Récapitulatifs des résultats des analyses de variance du premier essai.....</i> | 67 |
| Annexe 7 : <i>Récapitulatifs des résultats des analyses de variance du deuxième essai.....</i> | 75 |
| Annexe 8 : <i>Culture hydroponique du maïs</i> | 81 |

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.

RESUME

Ce rapport présente les résultats de l'étude de l'influence du nickel sur la croissance, le développement et la nutrition minérale du maïs, obtenus en 1991 grâce à deux expérimentations en serre.

Il ressort de cette étude que le nickel est toxique à de très faibles teneurs dans le végétal, puisque les premiers signes de toxicité apparaissent dans le deuxième essai pour une teneur de 30,8 ppm de Ni dans les tiges et feuilles sèches du maïs. Une teneur de 15,3 ppm n'induit aucune toxicité apparente. Le seuil de toxicité dans les tiges et feuilles sèches est donc compris entre 15,3 et 30,8 ppm de Ni. Au 36ème jour de végétation, cette dernière teneur induit notamment un ralentissement de la croissance en hauteur de 11,4 % et une baisse de poids de la matière sèche totale de 31,1 % par rapport aux données correspondantes d'un témoin.

A la fin de l'expérience, soit 6 semaines après l'apport de sulfate de nickel, la concentration en nickel dans les percolats (solution du sol) correspondant à cette teneur toxique dans le végétal est de 3,81 mg/l (soit 64,9 µmole/l). A 0,30 mg/l (soit 5,1 µmole/l), aucune toxicité n'apparaît. Le seuil de toxicité dans les percolats est donc compris entre 0,30 et 3,81 mg/l de Ni.

Les apports de sulfate de nickel correspondant à ces deux concentrations sont de 368 mg/kg de sol au cours du premier essai, et 184 mg/kg de sol au cours du deuxième essai. Bien qu'étant plus faible que le premier, ce dernier apport a engendré une concentration en nickel dans les percolats plus importante. Ces résultats montrent que la solubilisation du nickel dépend de l'environnement chimique (différent entre les deux essais) dans lequel il se trouve. Ainsi, le niveau de toxicité pourrait dépendre davantage de la concentration en nickel dans la solution du sol, que de la teneur du sol en nickel total.

Par ailleurs, le nickel est un élément qui se fixe en très grande quantité sur le sol de l'essai, puisque pour un apport de 250,9 mg/pot au cours du premier essai, seulement 1,58 mg restent en solution.

D'autre part, il semble qu'un excès de nickel dans le milieu de culture puisse diminuer l'absorption de l'azote, du sodium et de manganèse.

Enfin, les symptômes visuels de toxicité constatés sont les suivants :

- un très mauvais enracinement général. Les plants ayant reçu les fortes doses de nickel avaient des racines primaires très peu développées ;
- une nécrose de l'extrémité des jeunes feuilles, allant jusqu'à une nécrose complète du limbe ;
- un aspect extrêmement chétif des plants ayant reçu les fortes doses de sulfate de nickel.

MOTS-CLES : nickel, toxicité, symptômes, maïs.

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 de la mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie, est motivée par le fait que ces sols présentent souvent de fortes teneurs en éléments métalliques (Ni, Cr, Co et Mn). La teneur en nickel, en particulier, atteint fréquemment 1 %.

C'est donc tout naturellement que les premières études portent sur le nickel.

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

1- préciser, sur un sol pratiquement sans nickel, les seuils de toxicité du nickel sur le maïs en utilisant des doses croissantes de sulfate de nickel ;

2- caractériser l'influence de cet élément sur l'absorption des autres nutriments ;

3- repérer les symptômes de cette toxicité sur le végétal.

Deux expérimentations ont dû être conduites l'une à la suite de l'autre pour parvenir à des résultats corrects : les doses de nickel appliquées lors du premier essai étaient trop faibles pour engendrer une toxicité importante sur le maïs. En effet, après dosage du nickel dans les percolats de ce premier essai, nous avons constaté qu'ils n'en contenaient que très peu en solution. Une étude de la fixation du nickel nous a permis de vérifier alors que celui-ci était fixé en très grande quantité sur le sol de l'essai (cf. annexe 1).

Ces résultats nous ont donc conduits à reprendre la même expérimentation, mais avec des doses de nickel plus importantes.

2. MISE EN PLACE ET CONDUITE DES ESSAIS

2.1. Choix du sol

Le but de l'étude étant d'obtenir une courbe de réponse du maïs à des doses croissantes de nickel, le sol choisi devait présenter naturellement la plus faible teneur en nickel possible.

Après examen des cartes pédologiques du centre ORSTOM et des résultats de diverses prospections sur le terrain, un sol peu évolué d'apport alluvial de la région de La Foa a été choisi pour la conduite des essais en serre. Ce sol, de texture sablo-limoneuse, contient 157 ppm de Ni total, ce qui est faible en comparaison des teneurs en nickel de la plupart des autres sols du Territoire (Latham *et al.*, 1978). (cf. les résultats des analyses physico-chimiques du sol de l'essai en annexe 2).

2.2. Le facteur étudié

Dans les deux essais, 5 doses de sulfate de nickel, plus un témoin, ont été appliquées :

Tableau 1. Doses de sulfate de nickel appliquées dans les deux essais, et quantités de nickel correspondantes

| Doses | 1 ^{er} essai | | 2 ^{ème} essai | |
|-------|---|----------|---|---------|
| | NiSO ₄ ¹ (mg/kg de sol) | Ni (ppm) | NiSO ₄ ¹ (mg/kg de sol) | Ni(ppm) |
| 1 | 0 (témoin) | 0 | 0 (témoin) | 0 |
| 2 | 23 | 5,14 | 184,1 | 41,13 |
| 3 | 46 | 10,28 | 368,2 | 82,26 |
| 4 | 92 | 20,56 | 736,4 | 164,51 |
| 5 | 184,1 | 41,13 | 1472,8 | 329,02 |
| 6 | 368,2 | 82,26 | 2945,6 | 658,04 |

2.3. Type et plan de l'expérimentation

Les deux essais en serre étaient basés sur le même dispositif : il s'agit d'un essai en blocs complets équilibrés de 72 pots à 6 répétitions et deux pots par parcelle.

Voici le plan des deux essais, avec le détail des différents indices i.j.r :

i = bloc (de 1 à 6) ;
j = dose de NiSO₄ (de 1 à 6) ;
r = répétition (de 1 à 2) ;

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| * | * | * | * | 5.5.1 | 5.5.2 |
| 1.2.1 | 1.2.2 | 3.4.1 | 3.4.2 | 5.6.1 | 5.6.2 |
| 1.5.1 | 1.5.2 | * | * | 5.4.1 | 5.4.2 |
| 1.4.1 | 1.4.2 | * | * | 5.3.1 | 5.3.2 |
| * | * | 3.5.1 | 3.5.2 | * | * |
| 1.6.1 | 1.6.2 | * | * | * | * |
| * | * | 3.6.1 | 3.6.2 | * | * |
| 1.1.1 | 1.1.2 | * | * | 5.2.1 | 5.2.2 |
| * | * | 3.1.1 | 3.1.2 | * | * |
| * | * | * | * | * | * |
| * | * | 3.3.1 | 3.3.2 | * | * |
| 1.3.1 | 1.3.2 | 3.2.1 | 3.2.2 | 5.1.1 | 5.1.2 |
| * | * | 4.1.1 | 4.1.2 | 6.6.1 | 6.6.2 |
| 2.4.1 | 2.4.2 | * | * | * | * |
| 2.2.1 | 2.2.2 | 4.3.1 | 4.3.2 | 6.1.1 | 6.1.2 |
| * | * | 4.6.1 | 4.6.2 | 6.4.1 | 6.4.2 |
| * | * | * | * | * | * |
| 2.3.1 | 2.3.2 | * | * | 6.5.1 | 6.5.2 |
| * | * | * | * | * | * |
| * | * | * | * | 6.3.1 | 6.3.2 |
| 2.1.1 | 2.1.2 | 4.2.1 | 4.2.2 | * | * |
| * | * | 4.4.1 | 4.4.2 | * | * |
| 2.6.1 | 2.6.2 | 4.5.1 | 4.5.2 | * | * |
| 2.5.1 | 2.5.2 | * | * | 6.2.1 | 6.2.2 |

Fig. 1. Plan de la serre et répartition des traitements.

¹ Nous écrivons NiSO₄ pour simplifier l'écriture, mais la formule correcte du sulfate de nickel est : NiSO₄, 6H₂O.

* Les cases vides du plan de la serre correspondent à l'imbrication d'une autre expérimentation conduite en même temps, et dont les résultats font l'objet d'un rapport différent.

2.4. Mise en place et conduite de l'expérimentation

La technique de culture sur vase de végétation utilisée est celle mise au point par le laboratoire d'Agropédologie de Nouméa (cf. schéma en annexe 3), avec le maïs comme plante-test (hybride double GH 5010) choisi en raison de sa sensibilité aux déséquilibres minéraux et de sa rapidité de croissance et de développement.

La quantité de sol par pot a été déterminée de telle façon que la surface du sol arrive à 3 cm du sommet du vase de végétation. Ainsi, chaque pot a été rempli avec 6,1 kg de sol sec.

Les différentes doses de sulfate de nickel ont été apportées sous forme dissoute dans les cuvettes d'irrigation des vases de végétation. Ces apports ont été faits respectivement 19 jours et 8 jours avant le semis dans le premier et le deuxième essai, afin de laisser le temps à la solution de s'infiltrer dans le sol et de réagir avec lui éventuellement. Pour cela, les percolats ont été remontés respectivement 7 fois et 3 fois.

La même fumure complète a été apportée à tous les pots en trois fractions, pour que le nickel soit le seul facteur de variation influençant la croissance de la plante (cf. fumure en annexe 4).

De plus, les différentes quantités d'ions SO_4^{2-} , 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 4). Ainsi, les quantités d'azote et de sulfate étaient les mêmes pour tous les pots de chaque essai.

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

Tableau 2. Nature et dates des principales interventions.

| Interventions | dates | |
|--|-----------------------|------------------------|
| | 1 ^{er} essai | 2 ^{ème} essai |
| Mise en place du système d'irrigation, et mise à la capacité au champ des pots | 11/03/91 | 19/04/91 |
| Application des doses de NiSO_4 | 15/03/91 | 7/05/91 |
| Germination des grains à l'étuve | 2/04/91 | 14/05/91 |
| Semis | 3/04/91 | 15/05/91 |
| Application des fumures correctrices | 2/04/91 | 17/05/91 |
| Application des fumures complètes: | | |
| semis | 2/04/91 | 17/05/91 |
| 10 ^{ème} jour | 12/04/91 | 27/05/91 |
| 20 ^{ème} jour | 22/04/91 | 5/06/91 |
| Traitements insecticide avec de la deltaméthrine | 9/04/91 | 25/05/91 |
| Récolte | 6/05/91 | 20/06/91 |

Les deux essais se sont rapidement succédées, si bien que les données climatiques furent très proches dans les deux cas (cf. annexe 5) : en effet, les températures moyennes étaient pratiquement les mêmes.

A la récolte, des échantillons de tiges et feuilles, de percolats et de sols ont été constitués 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.

3. RESULTATS DES OBSERVATIONS ET DES MESURES

Nous avons reporté en annexe les tableaux récapitulatifs des analyses de variance des résultats expérimentaux des deux essais (cf. annexes 6 et 7).

Les données de la plupart des paramètres influencés de façon significative sont, par contre, présentées ici sous forme de graphiques ou de tableaux.

3.1. Modifications morphologiques

Pratiquement aucune modification morphologique, liée aux doses croissantes de nickel, n'est apparue au cours de la première expérimentation.

Par contre, lors de la deuxième expérimentation, avec des doses de nickel plus importantes, on a observé les symptômes suivants, s'accentuant de façon hautement significative avec l'accroissement de la dose de sulfate de nickel :

- une nécrose de l'extrémité des jeunes feuilles, souvent du bord, allant jusqu'à une nécrose complète du limbe, qui apparaissait de façon très importante à partir de la dose 5 (cf. photos 2, 3 et 4, pages suivantes) ;

- un très mauvais enracinement. Les plants ayant reçu les fortes doses avaient des racines primaires très peu développées, à tel point que leur tenue en était fragilisée et que nombre d'entre eux ont dû être étayés. Ce symptôme apparaissait à partir de la dose 4 (cf. photo 4, page suivante) ;

- un aspect extrêmement chétif des plants ayant reçu les fortes doses de sulfate de nickel (cf. photo 4, page suivante).

3.2. Influence sur la croissance

Les figures 2 à 4 ci-contre, représentent l'influence de doses croissantes de sulfate de nickel, au cours des deux essais, sur :

- l'évapotranspiration potentielle horaire (ETPh) (Fig. 2a et 2b) ;
- la hauteur totale à la récolte, et les hauteurs du sol à la dernière feuille dégainée au cours de la croissance (Fig. 3a et 3b) ;
- les poids de matière sèche des tiges et feuilles, des racines, et des plants à la récolte (Fig. 4a et 4b).

On remarque l'absence quasi-générale d'influence des doses croissantes de nickel sur ces paramètres lors de la première expérimentation, de même que sur les paramètres suivants : la vitesse de croissance, le nombre de feuilles, et le poids de matière fraîche des tiges et feuilles à la récolte (cf. tableaux 1 et 2, en annexe 6).

Par contre, lors de la deuxième expérimentation, tous les paramètres cités ci-dessus sont influencés de façon hautement significative (cf. figures 2b, 3b et 4b, et tableaux 1 et 2 en annexe 7).

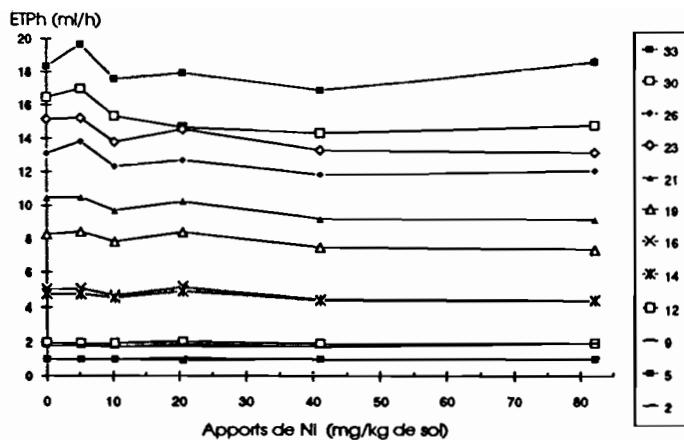


Fig. 2a. Mesures de l'ETPh du 2ème au 33ème jour en fonction des apports de Ni au cours du premier essai.

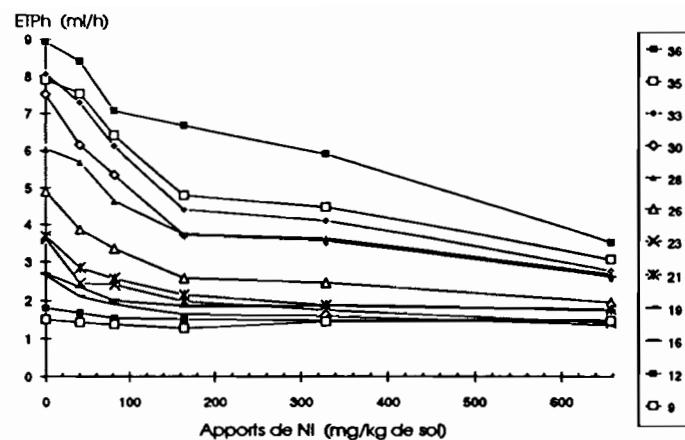


Fig. 2b. Mesures de l'ETPh du 9ème au 36ème jour en fonction des apports de Ni au cours du deuxième essai.

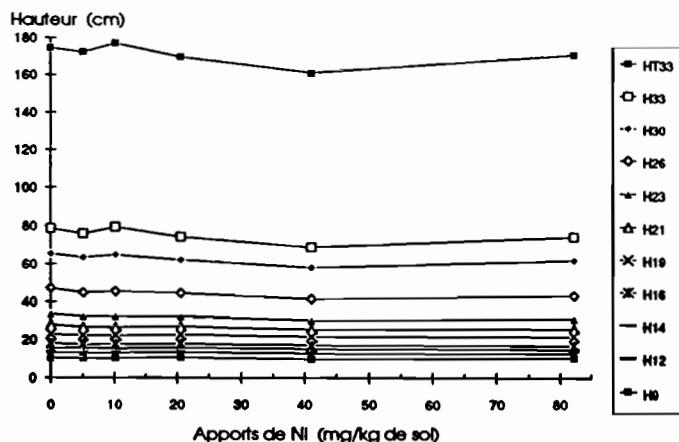


Fig. 3a. Mesures de la hauteur totale à la récolte et des hauteurs du sol à la dernière feuille dégainée du 9ème au 33ème jour en fonction des apports de Ni au cours du premier essai.

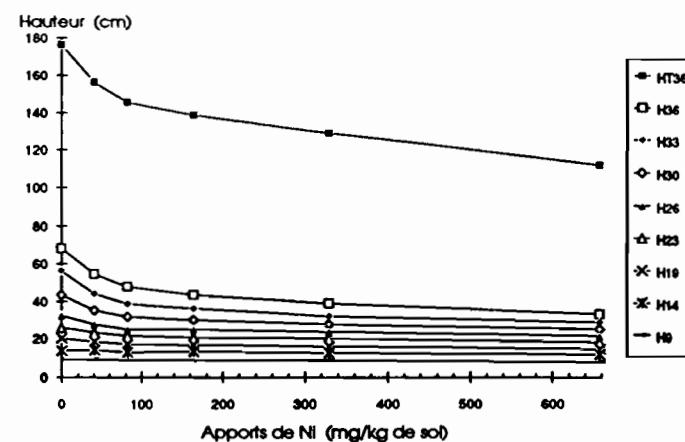


Fig. 3b. Mesures de la hauteur totale à la récolte et des hauteurs du sol à la dernière feuille dégainée du 9ème au 36ème jour en fonction des apports de Ni au cours du deuxième essai.

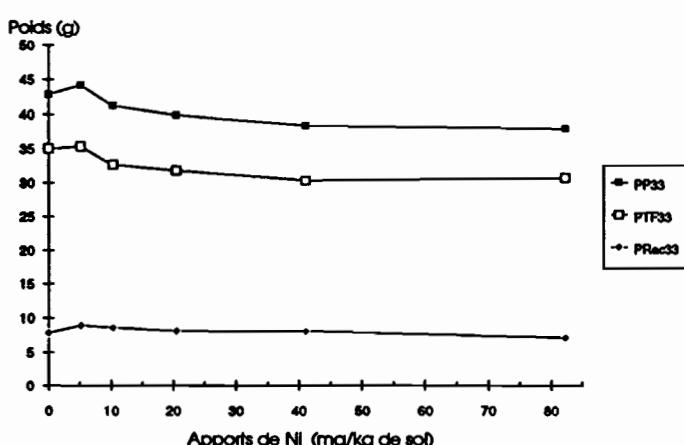


Fig. 4a. Mesures des poids de matière sèche des tiges et feuilles, des racines, et des plants à la récolte en fonction des apports de Ni au cours du premier essai.

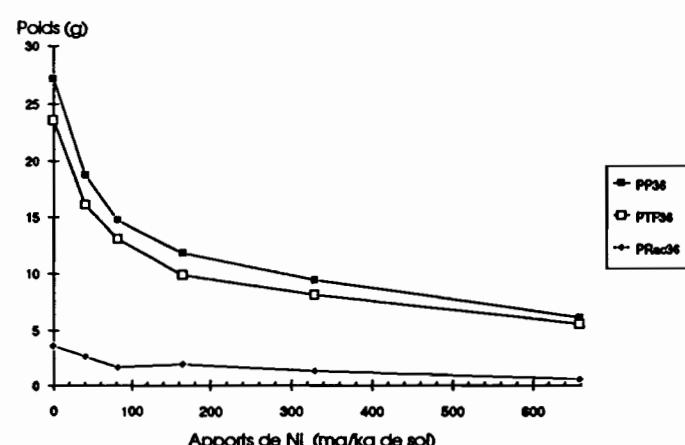


Fig. 4b. Mesures des poids de matière sèche des tiges et feuilles, des racines, et des plants à la récolte en fonction des apports de Ni au cours du deuxième essai.



Photo 1. Témoin sans nickel, au 28ème jour (2ème essai).

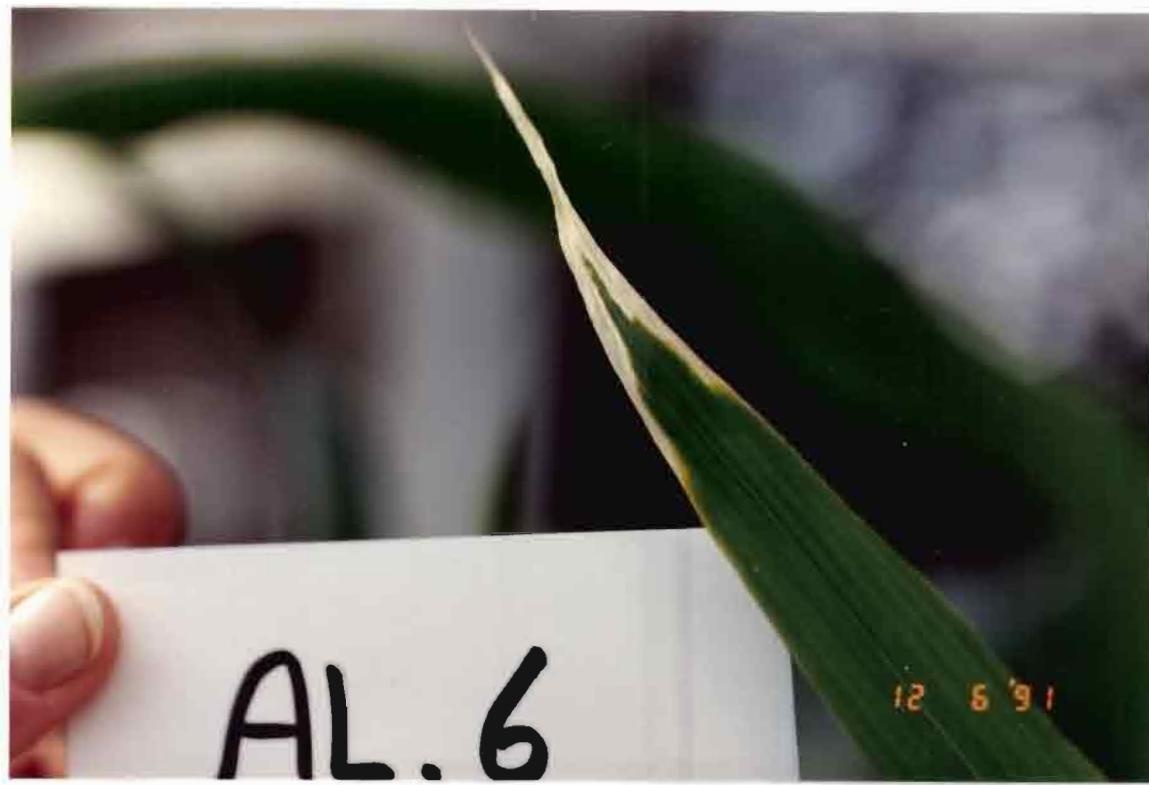


Photo 2. Détail d'une nécrose foliaire due à un excès de nickel (dose 6, 2ème essai).

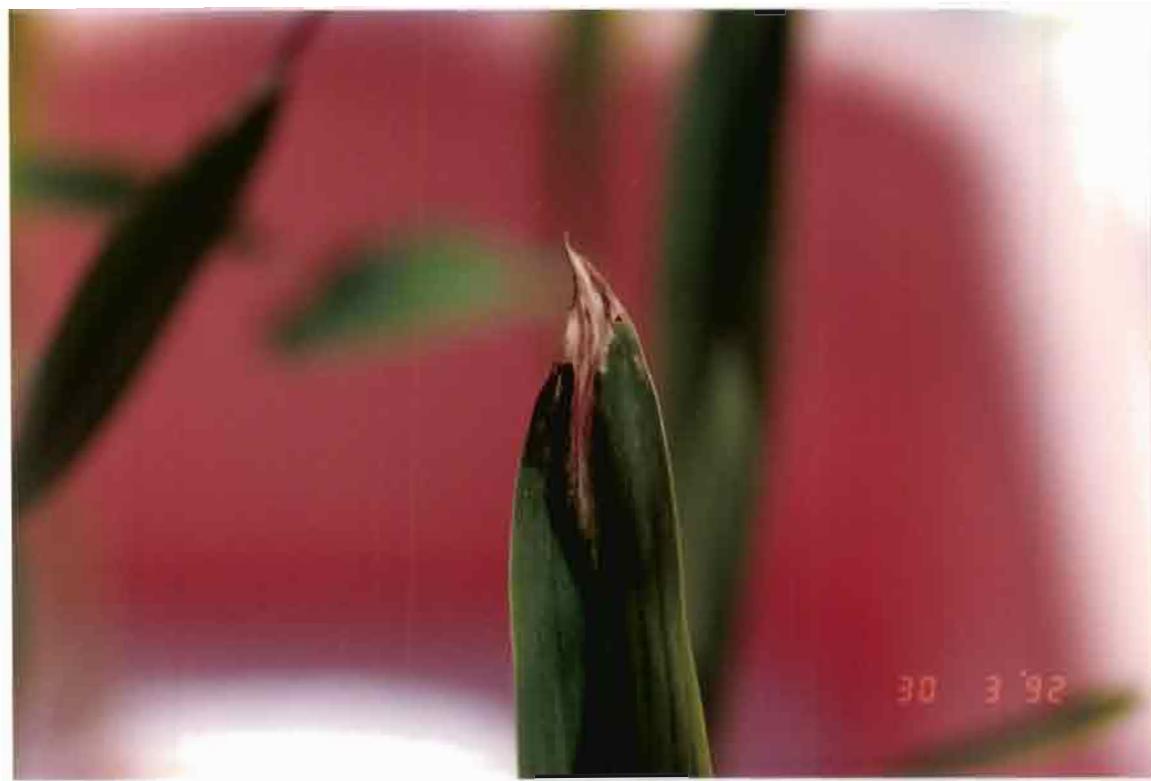


Photo 3. Détail d'une nécrose foliaire due à un excès de nickel.



Photo 4. Plant de maïs ayant reçu la dose 5 de nickel dans le 2ème essai, au 28ème jour : sa tenue est fragile (présence d'un tuteur nécessaire), il manifeste des nécroses foliaires, et sa taille est petite par rapport au témoin.

3.3. Influence sur les teneurs des différents éléments dans les tiges et feuilles

Les résultats des analyses minérales des parties aériennes sont retranscrits, pour les deux essais, dans le tableau 3 ci-contre.

Aucun effet important n'est à noter sur le premier essai, si ce n'est une augmentation significative de la teneur en nickel, une diminution de la teneur en manganèse, et une légère augmentation de la teneur en calcium dans les tiges et feuilles.

Par contre, sur le deuxième essai, en plus de l'augmentation très forte de la teneur en nickel, on constate, lorsque la dose de sulfate de nickel augmente :

- un effet très hautement significatif sur les teneurs en potassium et en manganèse, la première augmentant et la seconde diminuant ;

- une augmentation de la teneur en silice, en calcium, en magnésium, et dans une moindre mesure en cobalt ;

- une diminution assez importante de la teneur en phosphore.

La teneur en fer, pour sa part, passe par un maximum pour la dose 4.

3.4. Influence sur les percolats

Les résultats des analyses de percolats, réalisées en fin d'essai, sont retranscrits, pour les deux essais, dans le tableau 4 en page suivante.

S'agissant des résultats du premier essai, les teneurs en éléments ne sont pas influencées de façon significative par les doses croissantes de sulfate de nickel, à l'exception de la teneur en nickel qui augmente avec la dose de NiSO_4 .

Par contre, pour ce qui est des résultats du second essai, de nombreux paramètres sont influencés par le facteur "dose de sulfate de nickel". Lorsque celle-ci augmente, on constate ainsi :

- une augmentation importante du pH et de la conductivité ;

- des augmentations très significatives :

- o des teneurs en sulfates ;

- o en nitrates ;

- o en calcium et en magnésium ;

- o en nickel ;

- o et, dans une moindre mesure, des teneurs en chlorures et en sodium.

TABLEAU 3. TENEURS EN ELEMENTS MINERAUX DANS LES TIGES ET FEUILLES SECHES
A LA FIN DES DEUX ESSAIS EN SERRE EN FONCTION DES DOSES DE NiSO₄

| Eléments (unités) | Moyennes générales | 1 ^{er} ESSAI | | | | | | Probabilité du facteur dose | 2 ^{ème} ESSAI | | | | | | Probabilité du facteur dose | | |
|----------------------|-----------------------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------------------------|------------------------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|-----------------------------------|--------|--|
| | | Doses de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | | Moyennes générales | Doses de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | | |
| | | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184) | D6 (368) | | | D1 (0) | D2 (184) | D3 (368) | D4 (736) | D5 (1473) | D6 (2946) | | |
| Si (%) | 2,04 | 2,07 | 2,02 | 2,09 | 2,03 | 1,91 | 2,14 | 0,6100 | 2,84 | 2,31 | 2,79 | 3,06 | 3,01 | 3,03 | 2,81 | 0,9991 | |
| N (%) | 1,55 | 1,61 | 1,42 | 1,56 | 1,46 | 1,59 | 1,69 | 0,4913 | 3,59 | 3,48 | 3,56 | 3,69 | 3,65 | 3,58 | 3,60 | 0,4985 | |
| P (%) | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,21 | 0,4777 | 0,22 | 0,26 | 0,23 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,20 | 0,9997 | |
| K (%) | 2,99 | 3,06 | 2,83 | 3,04 | 2,98 | 2,92 | 3,10 | 0,2023 | 4,67 | 3,32 | 4,26 | 4,83 | 4,83 | 5,28 | 5,53 | 1,0000 | |
| Ca (%) | 0,29 | 0,26 | 0,28 | 0,29 | 0,28 | 0,29 | 0,31 | 0,9405 | 0,44 | 0,37 | 0,41 | 0,44 | 0,47 | 0,48 | 0,49 | 0,9999 | |
| Mg (%) | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,36 | 0,34 | 0,34 | 0,36 | 0,8027 | 0,44 | 0,44 | 0,40 | 0,41 | 0,45 | 0,47 | 0,49 | 0,9986 | |
| Na (ppm) | 24,86 | 23,33 | 20,83 | 26,67 | 25,00 | 21,67 | 31,67 | 0,9509 | 31,94 | 26,67 | 33,33 | 31,67 | 33,33 | 35,00 | 31,67 | 0,5842 | |
| S (%) | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,20 | 0,17 | 0,16 | * | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| Cl (%) | 0,27 | 0,31 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | 0,26 | 0,29 | 0,6547 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| Fe (ppm) | 115,60 | 117,92 | 104,17 | 130,00 | 95,33 | 112,67 | 133,50 | 0,6752 | 109,85 | 109,17 | 103,50 | 107,83 | 124,58 | 117,08 | 96,92 | 0,9756 | |
| Al (ppm) | - | - | - | - | - | - | - | - | 22,61 | 18,33 | 18,00 | 16,33 | 29,42 | 30,25 | 23,33 | 0,8864 | |
| Mn (ppm) | 33,85 | 34,08 | 38,67 | 33,33 | 36,17 | 30,83 | 30,00 | 0,9723 | 60,43 | 83,83 | 70,83 | 68,50 | 58,67 | 49,00 | 31,75 | 1,0000 | |
| Ni (ppm) | 7,50 | 2,58 | 4,00 | 6,17 | 7,58 | 9,33 | 15,33 | 1,0000 | 44,78 | 4,50 | 30,83 | 42,17 | 43,67 | 58,58 | 87,92 | 1,0000 | |
| Cr (ppm) | 0,53 | 1,00 | 0,67 | 0,00 | 0,50 | 0,33 | 0,67 | 0,2638 | 0,35 | 0,17 | 0,25 | 0,42 | 0,42 | 0,25 | 0,58 | 0,0812 | |
| Co (ppm) | 1,47 | 1,25 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,58 | 0,1700 | 2,64 | 2,17 | 2,50 | 2,83 | 2,58 | 2,75 | 3,00 | 0,9837 | |
| Cu (ppm) | 3,81 | 3,67 | 3,83 | 4,33 | 3,42 | 3,83 | 3,75 | 0,6002 | 6,96 | 7,17 | 7,33 | 7,00 | 7,00 | 6,92 | 6,33 | 0,8858 | |
| Zn (ppm) | 25,53 | 28,58 | 23,17 | 29,13 | 23,67 | 22,83 | 25,58 | 0,9561 | 48,50 | 49,33 | 46,00 | 50,50 | 47,50 | 49,00 | 48,67 | 0,0691 | |

* Ce paramètre n'a été dosé que sur des échantillons moyens, ce qui ne permet pas d'effectuer une analyse de variance.

TABLEAU 4. ANALYSE DES PERCOLATS RECOLTES A LA FIN DES DEUX ESSAIS EN FONCTION DES DOSES DE NiSO₄

| Paramètres (unités) | Moyennes générales | 1 ^{er} ESSAI | | | | | | Probabilité du facteur dose | Moyennes générales | 2 ^{ème} ESSAI | | | | | | Probabilité du facteur dose |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-----------------------------------|
| | | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184) | D6 (368) | | | D1 (0) | D2 (184) | D3 (368) | D4 (736) | D5 (1473) | D6 (2946) | |
| pH | 7,13 | 7,22 | 7,12 | 7,29 | 6,86 | 7,22 | 7,05 | 0,3828 | 5,77 | 4,66 | 5,13 | 5,15 | 5,89 | 6,87 | 6,94 | 1,0000 |
| Cond (µS/cm) | 435,62 | 473,08 | 393,50 | 411,83 | 404,83 | 493,33 | 437,17 | 0,4098 | 2939,69 | 2077,33 | 2615,00 | 2646,67 | 3095,83 | 3246,67 | 3956,67 | 1,0000 |
| THCO ₃ (meq/l) | 1,23 | 1,34 | 1,34 | 1,27 | 1,05 | 1,32 | 1,05 | 0,0188 | 0,13 | 0,01 | 0,13 | 0,01 | 0,18 | 0,24 | 0,23 | 0,8719 |
| TCI (meq/l) | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,04 | 0,4487 | 0,25 | 0,19 | 0,20 | 0,21 | 0,27 | 0,28 | 0,32 | 0,9936 |
| TSO ₄ (meq/l) | 2,42 | 2,86 | 2,33 | 2,41 | 2,10 | 2,36 | 2,46 | 0,1903 | 20,63 | 14,38 | 19,08 | 18,97 | 22,08 | 22,53 | 26,75 | 1,0000 |
| TNO ₃ (meq/l) | 0,37 | 0,30 | 0,21 | 0,29 | 0,36 | 0,54 | 0,52 | 0,7951 | 12,59 | 7,04 | 10,53 | 10,24 | 13,30 | 14,08 | 20,33 | 1,0000 |
| TPO ₄ (mg/l) * | 1,68 | 1,45 | 0,83 | 1,22 | 2,01 | 2,56 | 2,02 | 0,7970 | 19,75 | 22,58 | 20,19 | 20,06 | 21,93 | 19,19 | 14,55 | 0,6003 |
| Σ ⁻ (meq/l) | 4,06 | 4,55 | 3,92 | 4,00 | 3,57 | 4,28 | 4,07 | 0,0997 | 33,60 | 21,62 | 29,94 | 29,44 | 35,83 | 37,13 | 47,64 | 1,0000 |
| TCa (meq/l) | 1,89 | 2,07 | 1,84 | 1,79 | 1,70 | 2,07 | 1,90 | 0,1211 | 13,62 | 7,78 | 11,81 | 12,66 | 13,74 | 15,40 | 20,36 | 1,0000 |
| TMg (meq/l) | 2,15 | 2,37 | 1,97 | 2,09 | 1,94 | 2,39 | 2,16 | 0,1372 | 16,04 | 9,09 | 13,88 | 14,89 | 16,14 | 18,19 | 24,07 | 1,0000 |
| TK (meq/l) | 0,14 | 0,13 | 0,09 | 0,11 | 0,17 | 0,22 | 0,14 | 0,8555 | 0,81 | 0,87 | 0,75 | 0,69 | 0,94 | 0,86 | 0,74 | 0,2778 |
| TNa (meq/l) | 0,29 | 0,34 | 0,26 | 0,28 | 0,24 | 0,31 | 0,29 | 0,3652 | 0,83 | 0,58 | 0,77 | 0,80 | 0,88 | 0,89 | 1,08 | 1,0000 |
| TNH ₄ (meq/l) | - | - | - | - | - | - | - | - | 3,17 | 4,11 | 3,57 | 2,4 | 4,51 | 2,87 | 1,57 | 0,8621 |
| Σ ⁺ (meq/l) | 4,48 | 4,92 | 4,16 | 4,28 | 4,05 | 4,98 | 4,50 | 0,1817 | 34,48 | 22,44 | 30,79 | 31,45 | 36,19 | 38,21 | 47,82 | 1,0000 |
| TFe (mg/l) | 0,25 | 0,13 | 0,12 | 0,55 | 0,18 | 0,41 | 0,12 | 0,6469 | 0,26 | 0,34 | 0,14 | 0,28 | 0,12 | 0,27 | 0,41 | 0,4309 |
| TMn (mg/l) | 0,36 | 0,11 | 0,48 | 0,37 | 0,46 | 0,29 | 0,43 | 0,1440 | 0,22 | 0,42 | 0,37 | 0,08 | 0,08 | 0,33 | 0,06 | 0,7629 |
| TNi (mg/l) | 0,20 | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,24 | 0,45 | 0,30 | 0,9840 | 22,31 | 0,12 | 3,81 | 5,87 | 22,49 | 41,08 | 60,49 | 0,9999 |
| TCr (mg/l) | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,2496 | 0,11 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,34 | 0,06 | 0,4488 |
| TCo (mg/l) | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,5610 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,8663 |
| TSiO ₂ (mg/l) | 33,93 | 35,33 | 34,08 | 33,17 | 32,83 | 36,33 | 31,83 | 0,1723 | 33,58 | 32,25 | 33,33 | 36,58 | 34,33 | 30,92 | 34,08 | 0,4187 |

* Les phosphates comprennent l'ensemble des formes existantes en solution (PO₄³⁻, HPO₄²⁻, H₂PO₄⁻, H₃PO₄). C'est pourquoi l'unité est en mg/l et non en meq/l.

- des diminutions importantes, mais non significatives :
 - o des teneurs en NH_4^+ ;
 - o des teneurs en phosphates.

Par ailleurs, en comparant les valeurs obtenues pour les deux essais, en particulier au niveau des témoins respectifs, on peut constater : une conductivité et des teneurs en sulfates, en phosphates, en calcium, en magnésium et en nickel beaucoup plus fortes dans le deuxième essai, de même qu'un pH plus faible.

3.5. Influence sur le sol

Les résultats des analyses de l'état initial du sol alluvial et de son état final en fonction du traitement à la fin de la première expérimentation sont retranscrits dans le tableau 5 en page suivante.

Les résultats des analyses de sol de la deuxième expérimentation ne sont malheureusement pas encore disponibles au moment de la rédaction de ce rapport. Ils feront l'objet d'un rapport annexe.

D'une manière générale, les différents paramètres ne semblent pas être influencés par les doses croissantes de nickel dans le premier essai.

Seul le nickel extrait par le DTPA² à pH 5,3 (Ni "extractible") est influencé de façon logique : sa valeur est d'autant plus forte que la dose de sulfate de nickel est importante.

4. DISCUSSION

Nous discuterons des phénomènes observés au niveau des sols et des percolats avant d'analyser ceux constatés au niveau des tiges et feuilles. En effet, ces derniers dépendent essentiellement du fonctionnement du système sol-percolat.

Néanmoins, le premier paragraphe est consacré aux remarques que nous pouvons faire sur les deux expérimentations, remarques qui serviront à apporter des éléments de réponses à certains problèmes dans la discussion.

4.1 Remarques initiales

La principale remarque qui peut être faite se situe au niveau des teneurs en ions SO_4^{2-} , NO_3^- et NH_4^+ apportés par les fumures correctrices, qui sont plus fortes dans la deuxième expérimentation. Par ailleurs, ces teneurs ont engendrés d'autres différences entre les deux essais - pour des apports de sulfate de nickel identiques - , comme les teneurs en nickel dans les percolats qui sont plus fortes dans le deuxième essai.

² DTPA = acide Diéthylène Triamine PentaAcétique.

TABLEAU 5. ANALYSE DE L'ETAT INITIAL DU SOL ET DE SON ETAT FINAL
A LA FIN DU PREMIER ESSAI EN FONCTION DES DOSES DE NiSO_4

| Paramètres (unités) | ETAT INITIAL | ETAT FINAL (1 ^{er} ESSAI) | | | | | | |
|--|-----------------|------------------------------------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| | | Moyennes générales | doses de NiSO_4 (mg/kg de sol) | | | | | |
| | | | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184) | D6 (368) |
| pF 2,5 (%) | 17,60 | 18,40 | 18,40 | 18,40 | 18,70 | 18,40 | 18,30 | 18,20 |
| pF 3,0 (%) | 14,70 | 15,67 | 15,60 | 15,60 | 15,70 | 15,60 | 15,80 | 15,70 |
| pF 4,2 (%) | 9,50 | 9,67 | 9,60 | 9,70 | 9,70 | 9,70 | 9,70 | 9,60 |
| pH H_2O | - | 6,10 | 6,05 | 6,05 | 6,04 | 6,05 | 6,02 | 6,12 |
| pH KCl | - | 5,10 | 5,14 | 5,13 | 5,14 | 5,08 | 5,10 | 5,20 |
| CT (mg/g) | 10,60 | 11,35 | 10,60 | 12,40 | 12,10 | 10,50 | 10,50 | 12,00 |
| NT (mg/g) | 1,07 | 1,20 | 1,12 | 1,31 | 1,28 | 1,12 | 1,11 | 1,27 |
| C/N | - | 9,90 | 9,44 | 9,46 | 9,47 | 9,45 | 9,37 | 9,46 |
| CaE (meq%) | 8,53 | 8,67 | 8,61 | 8,76 | 8,57 | 8,67 | 8,59 | 8,84 |
| MgE (meq%) | 7,35 | 7,19 | 7,27 | 7,18 | 7,24 | 7,14 | 7,12 | 7,17 |
| KE (meq%) | 0,32 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,24 |
| NaE (meq%) | 0,13 | 0,23 | 0,30 | 0,18 | 0,29 | 0,24 | 0,21 | 0,17 |
| Σ BE (meq%) | 16,35 | 16,34 | 16,43 | 16,37 | 16,34 | 16,30 | 16,18 | 16,42 |
| CEC (meq%) | 15,15 | 15,87 | 15,95 | 15,65 | 16,05 | 15,85 | 16,10 | 15,60 |
| Σ BE/CEC (%) | 107,90 | 103,02 | 103,04 | 104,60 | 101,84 | 102,84 | 100,50 | 105,30 |
| Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | - | 217,67 | 226,00 | 198,00 | 209,00 | 235,00 | 211,00 | 227,00 |
| P ₂ O ₅ As (mg/g) | 0,103 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,12 |
| P ₂ O ₅ total (mg/g) | 1,50 | - | - | - | - | - | - | - |
| Ni total (ppm) | 157,00 | - | - | - | - | - | - | - |
| Ni Extract. (ppm) | 10,70 | 24,67 | 10,7 | 12,7 | 15,1 | 19,3 | 34,0 | 56,2 |

N. B. Tous ces paramètres n'ont été dosés que sur des échantillons moyens, ce qui ne permet pas d'effectuer d'analyses de variance.

Cependant, ces différences n'ont pu être évitées, puisque c'est à la suite du premier essai que nous avons décidé de conduire le deuxième, en sachant pleinement que l'apport de doses de sulfate de nickel plus importantes nous obligeraient à apporter des fumures correctrices supérieures à celles du premier essai.

4.2. Modalités d'actions sur le sol

4.2.1. Estimation de la quantité de nickel assimilable par la plante

Le nickel dit "extractible" a été extrait du sol par le DTPA à pH 5,3. Le DTPA est un puissant chélateur qui a de fortes affinités pour les ions métalliques. La fraction du métal qu'il prélève d'un sol est susceptible de se rapprocher de la fraction dite "assimilable" par la plante. Nous disposons donc là d'une méthode d'extraction intéressante qui peut nous renseigner rapidement sur la quantité de nickel qu'une plante peut absorber, et nous permettre ainsi d'avancer des prédictions à propos des risques de toxicité due au nickel d'un sol non cultivé, afin d'éviter de le mettre en culture ou d'adapter la culture si de tels risques sont mis en évidence.

Les résultats de l'extraction du nickel présent dans le sol de l'essai par le DTPA montrent qu'ils sont étroitement corrélés avec les teneurs totales en nickel dans le sol en fonction des doses de NiSO_4 (coefficient de corrélation $r=0,998$) (cf. figure 5). Par ailleurs, sur les 157 ppm de Ni contenus naturellement dans le sol, le DTPA en extrait seulement 10,7. Donc environ 146 ppm ne sont pas disponibles pour le DTPA, soit en étant piégés dans une matrice et non accessibles, soit en étant très fortement fixés. Le fait d'ajouter 82,26 ppm de Ni (dose 6 de NiSO_4 dans le premier essai) permet au DTPA d'en extraire 45,5 ppm supplémentaires. Le nickel ajouté est donc beaucoup plus disponible que celui présent initialement dans le sol, mais près de la moitié des 82,26 ppm de Ni se fixe tout de même sous une forme non extractible par le DTPA.

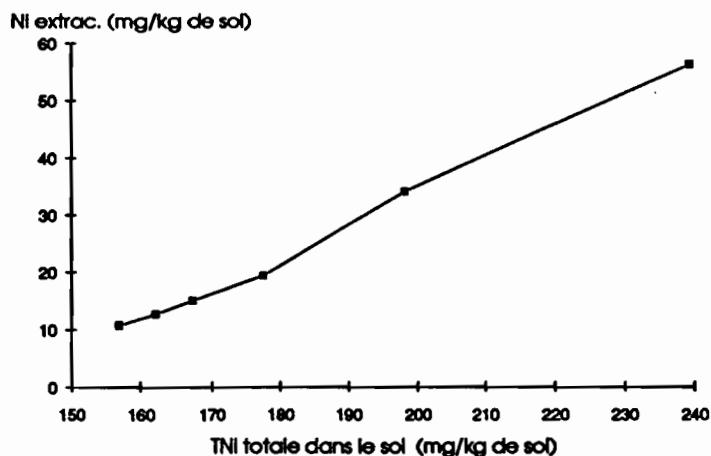


Fig. 5. Quantités de nickel extractible par le DTPA à pH 5,3 en fonction des teneurs totales en Ni dans le sol selon les doses de NiSO_4 .

Les quantités de nickel extractible par pot sont très supérieures aux immobilisations dans les tiges et feuilles du maïs. Même si l'immobilisation du nickel ne comprend que la part des tiges et feuilles (les racines étant trop souillées par le sol pour pouvoir être analysées), il est clair que l'extraction du nickel du sol par le DTPA est trop élevée. Le tableau 6 qui suit nous renseigne sur ces différences.

Tableau 6. Comparaison des quantités de Ni extractibles par le DTPA à pH 5,3 avec les quantités de Ni immobilisées dans les tiges et feuilles du maïs en fonction des doses de nickel (1^{er} essai)

| | Doses de Ni (mg/pot) | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 0 | 31,36 | 62,72 | 125,45 | 250,90 | 501,80 |
| Ni extractible par DTPA (mg/pot) | 65,27 | 77,47 | 92,11 | 117,73 | 207,40 | 342,82 |
| Ni immobilisé (mg/plant) | 0,090 | 0,143 | 0,201 | 0,244 | 0,280 | 0,489 |

Toutefois, nous ne pourrons probablement pas obtenir des quantités identiques à celles que la plante absorbe, la mise au point d'une telle technique demandant beaucoup de temps. En effet, cette méthode doit être adaptée à chaque type de sol, car les forces de fixation d'un métal par un sol dépendent des caractéristiques physico-chimiques de ce dernier. Elle doit aussi être adaptée en fonction de la plante étudiée, puisqu'il existe de grandes différences entre les espèces et même entre les variétés, cultivées sur un même sol, au niveau de l'absorption du nickel (cf. étude bibliographique de L'Huillier L. et Edighoffer S., 1991).

Cependant, même si les valeurs sont différentes, il existe une bonne corrélation entre les quantités de nickel immobilisées dans les tiges et feuilles du maïs et les quantités de nickel extractibles par le DTPA (coefficient de corrélation $r=0,968$) (cf. figure 6). Ainsi, il suffirait de déterminer des valeurs de nickel extractible de référence qui correspondraient à des teneurs toxiques dans diverses plantes étudiées. Pour le maïs, les résultats de l'extraction du nickel du sol par le DTPA nous permettent de constater que 342,82 mg/pot de nickel extrait, soit 56,2 ppm, ne correspondent pas encore à une teneur toxique en nickel dans le maïs.

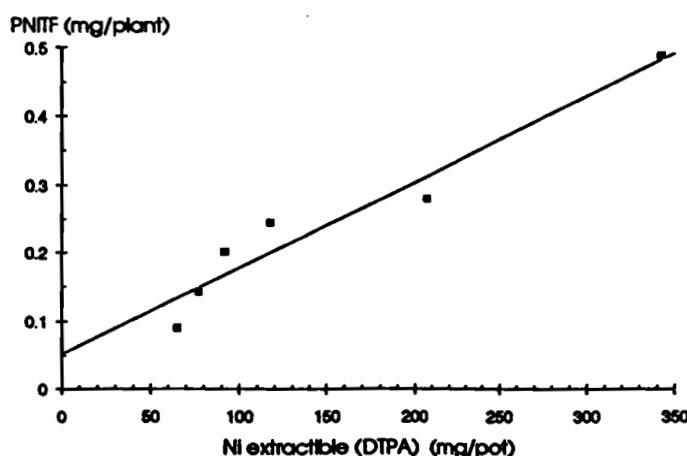


Fig. 6. Quantités de nickel immobilisées dans les tiges et feuilles en fonction des quantités de nickel extractible.

De telles prédictions sont encore loin d'être au point et un travail de recherche important doit encore être fait. Ainsi, dans le cadre de ce programme de recherche, l'extraction du nickel par le DTPA devrait être précisée pour les sols ferrallitiques, en la comparant à l'absorption du nickel par le maïs utilisée jusqu'à présent comme plante-test. Par la suite, la méthode devrait être comparée à l'absorption du nickel par d'autres plantes.

4.2.2. Teneurs toxiques du nickel dans le sol

Le sol d'alluvion de l'essai contient naturellement 157 ppm de nickel, et cette teneur n'induit aucune toxicité sur le maïs.

Le fait de rajouter 184 mg de NiSO₄ /kg de sol dans le deuxième essai, c'est à dire 41,1 ppm de Ni, induit un début de toxicité.

Le nickel est donc un élément qui peut être toxique à de très faibles teneurs dans le sol, à condition qu'il soit accessible à la plante. En effet, cet élément a un très fort pouvoir de fixation sur le sol : les résultats de l'annexe 1 montrent que plus de 99 % du nickel apporté est fixé sur le sol lors du premier essai.

La comparaison des deux essais nous permet de constater que les doses communes de sulfate de nickel (184 et 368 mg/kg de sol) ont des effets différents suivant l'environnement, chimique en particulier (les fumures correctrices étant différentes), dans lesquelles elles sont placées. En effet, aucune toxicité n'apparaît dans le premier essai contrairement au second. Ainsi, ce n'est pas seulement la quantité totale de nickel présente dans le sol qui est importante, mais c'est aussi l'environnement chimique dans son ensemble qui doit être considéré comme pouvant influencer le pouvoir toxique du nickel. Le chapitre suivant à propos des percolats nous éclaire un peu plus à ce sujet.

4.3. Modalités d'actions sur les percolats

4.3.1. Interprétation des effets observés

De nombreux effets semblent dûs, directement ou de façon induite, à l'apport des fumures correctrices alors que d'autres sont probablement dûs aux apports de doses croissantes de nickel. Dans un souci de compréhension des mécanismes intervenant dans les percolats, nous discutons ici des effets constatés non seulement par paramètre, mais nous nous efforçons de les grouper par les mécanismes qui les ont fait apparaître.

Les fumures correctrices (cf. annexe 4) ont induit des différences de fumure entre les pots et entre les deux essais : d'une part, au sein d'un essai, même si la fumure azotée est quantitativement identique pour tous les pots, il y a des différences qualitatives entre les différentes doses de sulfate de nickel car les doses 1 ont davantage d'ions NH₄⁺ que les doses 6, qui elles ont davantage d'ions NO₃⁻ que les doses 1, et d'autre part, entre les deux essais, les quantités d'ions SO₄²⁻ et d'azote

sont plus élevées dans le deuxième. Ces différences semblent avoir des répercussions importantes sur la mise en solution d'éléments et le fonctionnement de la plante.

Ainsi, dans le deuxième essai, la baisse importante du pH constatée au niveau des faibles doses de sulfate de nickel est probablement due aux quantités plus importantes d'ions NH_4^+ apportés par la fumure azotée : en effet, la nutrition ammoniacale entraîne une baisse du pH car des ions H^+ sont libérés par la plante en échange de l'absorption d'ions NH_4^+ , de manière à réaliser l'équilibre des charges dans le milieu.

L'effet observé sur le pH dans le deuxième essai semble expliquer la diminution de la teneur en phosphates lorsque la dose de nickel augmente. En effet, les phosphates sont plus solubles à pH acide. Il est aussi possible que l'apport croissant de nickel diminue la quantité de phosphore assimilable en formant un composé peu soluble.

Toutefois, à pH comparable entre les deux expérimentations (doses 5 et 6) et à doses de sulfate de nickel identiques, les teneurs en phosphates sont toujours plus élevées dans la seconde. Il est probable que la concentration totale de la solution qui est plus élevée dans le deuxième essai - la mesure de la conductivité permet de le constater - ait entraîné une désorption partielle des phosphates de leurs sites de fixation sur le sol par d'autres anions, et une solubilisation plus importante.

Les effets observés dans le deuxième essai sur les teneurs en NH_4^+ et surtout en NO_3^- sont très certainement dûs aux fumures correctrices.

Par ailleurs, la conductivité est non seulement plus forte dans le deuxième essai, mais elle augmente aussi fortement avec l'apport de sulfate de nickel. La différence entre les deux essais est normale étant données celles qui existent entre les apports de sulfate de nickel et de fumures correctrices. Quant à l'effet observé, il est principalement dû aux ions SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} , dont les teneurs sont élevées et augmentent aussi beaucoup avec le traitement.

La teneur plus élevée en sulfates dans le deuxième essai est due à la fumure correctrice, et l'augmentation de cette teneur, lorsque la dose de nickel augmente, semble accompagner l'accroissement de charges positives (Σ^+ dans le tableau 4) dans les percolats de façon à équilibrer les charges.

Par contre, les doses croissantes de nickel peuvent être en partie à l'origine des augmentations importantes des teneurs en Ca^{2+} et en Mg^{2+} dans le deuxième essai : d'une part, les quantités de plus en plus importantes de sulfates et de nitrates dans les percolats semblent les entraîner en solution du fait de leurs attractions ioniques, mais d'autre part, l'apport croissant de nickel semble pouvoir déplacer ces cations du complexe d'échange en entrant en compétition avec eux au niveau de leurs sites de fixation. En effet, les quantités de calcium et de magnésium échangeables sont proches des quantités de nickel apportées, puisqu'il y a 520 méq/pot de Ca^{2+} échangeable, 448 méq/pot de Mg^{2+} échangeable (cf. annexe 2), et de 0 à 137 méq/pot

de Ni^{2+} apporté. Les fortes doses de nickel sont donc susceptibles de déplacer des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du complexe d'échange.

A propos du nickel, l'augmentation dans les deux essais de sa teneur dans les percolats est logique puisqu'elle obéit à l'augmentation de l'apport de nickel. La figure 7 qui suit nous montre ces augmentations, et nous permet de nous rendre compte que les quantités de nickel solubilisées sont faibles par rapport aux quantités présentes dans le sol, surtout dans le premier essai.

Il existe par ailleurs des différences importantes entre les deux essais (cf. fig. 7) puisque pour les doses communes de NiSO_4 , c'est à dire 0 - 184 et 368 mg/kg de sol, les teneurs en nickel dans les percolats du premier essai sont respectivement de 0,04 - 0,45 et 0,30 mg/l, alors qu'elles sont de 0,12 - 3,81 et 5,87 mg/l dans le second. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que le nickel est probablement davantage solubilisé par les teneurs plus élevées en sulfates dans le deuxième essai. Ainsi, l'environnement chimique dans lequel se trouve le nickel influe fortement sur sa mise en solution.

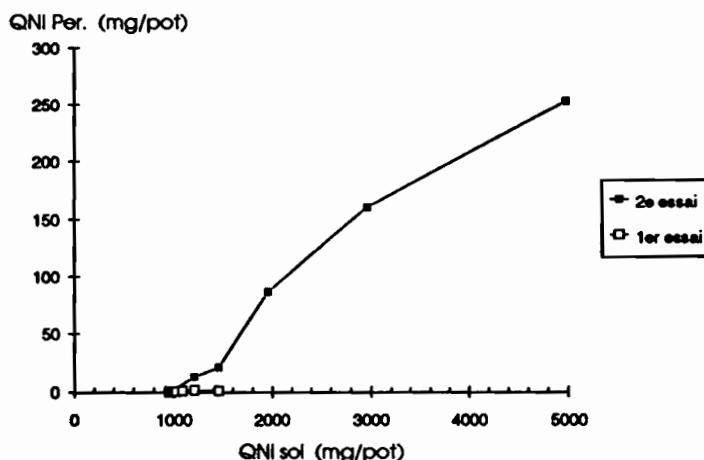


Fig. 7. Quantités totales de nickel dans les percolats en fonction des quantités totales de nickel dans le sol selon les doses de NiSO_4 .

4.3.2. Teneurs toxiques du nickel dans les percolats

Les premiers symptômes de toxicité sont observés à partir de la dose 2 dans le deuxième essai (184 mg de NiSO_4 /kg de sol), ce qui correspond à une teneur en nickel dans les percolats de 3,81 mg/l (64,9 $\mu\text{mole/l}$).

La dose 1 (témoin), donnant 0,12 mg/l de nickel en solution dans le deuxième essai, n'induit aucune toxicité apparente, de même que la dose 5 dans le premier essai donnant 0,45 mg/l de nickel (7,66 $\mu\text{mole/l}$).

Ainsi, le seuil de toxicité du nickel dans la solution du sol est compris entre 0,45 et 3,81 mg/l, soit entre 7,66 et 64,9 $\mu\text{mole/l}$. Il serait utile de préciser davantage ce seuil.

La comparaison des deux essais nous permet de constater que les apports identiques de sulfate de nickel (184 et 368 mg/kg de sol) engendrent, d'une part, des teneurs en nickel dans les percolats plus fortes dans le deuxième essai que dans le premier, et d'autre part, une toxicité dans le deuxième et non dans le premier essai. Ainsi, on peut faire l'hypothèse selon laquelle l'absorption du nickel par le maïs dépend peu de la quantité totale de nickel présente dans le sol, mais est essentiellement dépendante de la quantité de nickel présente dans la solution du sol.

Une expérimentation conduite au laboratoire (cf. annexe 8) nous apporte des arguments supplémentaires pour renforcer cette hypothèse : en effet, le maïs cultivé dans des solutions de nickel manifeste des symptômes de toxicité à partir de 30 µmole/l de Ni. Ce seuil est compris dans la fourchette établie grâce aux essais en serre, ce qui laisse fortement à penser que c'est principalement le nickel en solution qui est absorbé par le maïs et qui induit une toxicité. De plus, le seuil de toxicité du nickel dans la solution du sol semble davantage précisé par cette expérimentation, et serait compris entre 20 et 30 µmole/l (1,17 et 1,76 mg/l).

4.3.3. Comparaison des conditions en serre avec celles au champ

Les risques de toxicité au champ semblent pouvoir être plus élevés que ceux en serre. En effet, la solution du sol des vases de végétation est plus diluée que celle qui percolé dans un sol en plein champ. On peut estimer cette dilution de la façon suivante :

- d'une part, en considérant les capacités de rétention d'eau du sol de l'essai (cf. annexe 2), on a :

- . à pF 2,5 (capacité au champ) : 176 ml/kg de sol ;
- . à pF 4,2 (point de flétrissement) : 95 ml/kg de sol ;

- d'autre part, le volume de solution qui circule dans le vase de végétation est environ de 3 litres (entre le système d'irrigation et le volume compris dans le sol), soit environ 500 ml/kg de sol.

Ainsi, la concentration de la solution du sol en plein champ, par rapport à celle du vase de végétation, est plus concentrée d'environ :

- 3 fois à la capacité au champ ;
- 5 fois au point de flétrissement.

Si on considère l'hypothèse selon laquelle le nickel en solution est la forme principale du nickel absorbable par le maïs, alors les risques de toxicité au champ pourraient être plus élevés qu'en serre, dans les proportions citées ci-dessus.

4.4. Modalités d'actions sur la croissance

Les figures 2b, 3b et 4b en page 13 nous permettent de constater que la dose de 184 mg de NiSO₄/kg de sol dans la deuxième expérimentation est celle qui induit un début de toxicité. Les différences de croissance par rapport au témoin sont les suivantes :

Tableau 7. Comparaison de la croissance du témoin avec celle du plant manifestant les premiers symptômes de toxicité (à 184 mg de NiSO₄/kg de sol, 2^{ème} essai)

| Paramètres | Témoin (0 mg de NiSO ₄) | 184 mg de NiSO ₄ /kg de sol | Défauts (%) |
|--|--|---|----------------|
| ETPh 12 ^{ème} jour (ml/h) | 1,81 | 1,68 | 7,2 |
| ETPh 33 ^{ème} jour (ml/h) | 8,06 | 7,29 | 9,6 |
| Hauteur dernière feuille dégaine 19 jour (cm) | 20,08 | 18,42 | 8,3 |
| Hauteur dernière feuille dégaine 36 jour (cm) | 68,07 | 54,53 | 19,9 |
| Hauteur Totale 36 ^{ème} jour (cm) | 176,50 | 156,33 | 11,4 |
| Poids sec des tiges et feuilles 36 ^{ème} jour (g) | 23,58 | 16,08 | 31,8 |
| Poids sec des racines 36 ^{ème} jour (g) | 3,64 | 2,66 | 27,0 |
| Poids sec total des plants 36 ^{ème} jour (g) | 27,21 | 18,74 | 31,1 |

Les premiers symptômes de ralentissement de croissance apparaissent seulement au bout de quelques jours, le temps certainement nécessaire pour que le système racinaire se mette en place et pour que les réserves de la graine s'épuisent :

- entre le 9^{ème} et le 12^{ème} jour au niveau de l'ETPh (à partir de 184 mg de NiSO₄) ;
- vers le 9^{ème} jour au niveau de la hauteur (à partir de 368 mg de NiSO₄).

On constate l'apparition rapide d'un plateau à partir de 368 mg de NiSO₄ (cf. fig. 1b, 2b et 3b, page 13). Avant cette dose, la toxicité s'accentue rapidement. Au delà, les différences de croissance des plants sont plus faibles. A la dose de 368 mg/kg de sol, les différences par rapport au témoin sont les suivantes :

- une ETPH au 36^{ème} jour inférieure de 20,7 % ;
- une hauteur totale au 36^{ème} jour inférieure de 17,6 % ;
- un poids de matière sèche totale au 36^{ème} jour inférieur de 45,9% .

La comparaison des deux expérimentations montre la différence des effets des doses communes de sulfate de nickel (184 et 368 mg/kg de sol) sur la croissance, attribuée à la différence des teneurs en nickel dans les percolats constatée entre les deux essais. Le tableau 8 suivant nous renseigne sur ces différences :

Tableau 8. Comparaison des effets des doses communes de NiSO₄ entre les deux essais sur la croissance du maïs

| Paramètres (unités) | 184 mg de NiSO ₄ / kg de sol | | | 368 mg de NiSO ₄ / kg de sol | | |
|---|---|---------------------------|--------------------|---|---------------------------|--------------------|
| | 1er essai | 2 ^{ème} essai | différences (%) | 1er essai | 2 ^{ème} essai | différences (%) |
| HT récolte (cm) | 160,83 | 156,33 | 2,8 | 170,50 | 145,50 | 14,7 |
| Poids sec tiges et feuilles récolte (g) | 30,34 | 16,08 | 47,0 | 30,78 | 13,07 | 57,5 |
| Poids sec racines récolte (g) | 8,09 | 2,66 | 67,1 | 7,19 | 1,65 | 77,1 |
| Poids sec total plants récolte (g) | 38,43 | 18,74 | 51,2 | 37,98 | 14,73 | 61,2 |

4.5. Modalités d'actions sur les teneurs et les immobilisations en éléments dans les tiges et feuilles sèches

4.5.1. Interprétation des effets observés

Parmi les effets apparus sur les teneurs en éléments minéraux dans les tiges et feuilles dans le deuxième essai, plusieurs doivent pouvoir, pour une grande partie, être mis en relation avec les effets observés dans les percolats. Ainsi, lorsque l'apport de sulfate de nickel augmente, les teneurs en calcium, en magnésium et en nickel dans les tiges et feuilles augmentent parallèlement avec les teneurs en ces éléments dans les percolats.

Cependant, les percolats ne sont pas les seuls responsables de ces augmentations. En effet, il est clairement établi que les teneurs en éléments majeurs dans les parties aériennes du maïs diminuent quand la taille ou l'âge physiologique des plants augmente. Or, la taille des plants dans le deuxième essai diminue fortement lorsque la dose de nickel augmente (cf. figure 3b en page 13), ce qui influe par conséquent sur les augmentations des teneurs en calcium, en magnésium, et probablement même en nickel.

L'augmentation très importante de la teneur en potassium dans le deuxième essai, lorsque la dose de nickel augmente (cf. figure 8), semble pouvoir être entièrement due à ce processus reliant étroitement les teneurs en éléments majeurs avec la taille des plants. De même, la taille relativement constante des plants au cours du premier essai est certainement la cause de la faible variation de la teneur en potassium (cf. figure 8).

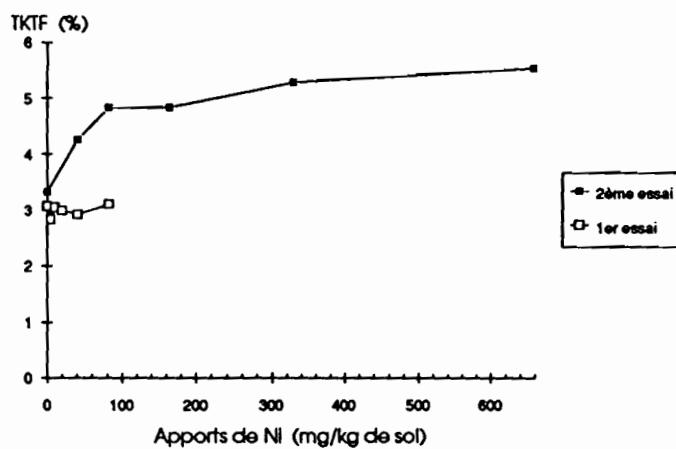


Fig. 8. Teneurs en potassium dans les tiges et feuilles sèches en fonction de l'apport de Ni.

En considérant ce processus, nous aurions dû constater les mêmes effets pour les teneurs en azote et en phosphore dans le deuxième essai. Or, aucun effet n'apparaît sur la teneur en azote, et un effet même contraire apparaît sur la teneur en phosphore puisqu'elle diminue lorsque la dose de nickel augmente.

La diminution de la teneur en phosphore dans les tiges et feuilles, lorsque la dose de nickel augmente, serait en fait due à la diminution de sa teneur dans les percolats, malgré la baisse de la taille des plants.

Par contre, l'observation de la teneur en azote est surprenante car elle n'augmente pas malgré la diminution de la taille des plants, et malgré l'augmentation de la teneur globale en azote dans les percolats. Il apparaît donc que l'absorption de nickel à de fortes doses puisse diminuer l'absorption d'azote par le maïs. Cependant, même aux apports importants de nickel, les teneurs en azote dans les tiges et feuilles des plants n'apparaissent pas déficientes.

Il semble que le nickel diminue aussi l'absorption du sodium. En effet, l'observation de l'absorption de sodium par un plant de maïs en plein champ montre que son immobilisation n'évolue pratiquement pas dans les cinquantes premiers jours environ de son développement et est proche de 4 mg/plant (Service de l'Agriculture, activités 1982). Or, par comparaison, les plants ayant reçu les fortes doses de nickel dans le deuxième essai en serre, à taille équivalente avec des plants au champ, ont des immobilisations en sodium beaucoup plus faibles de l'ordre de 0,2 mg/plant. De plus, l'augmentation significative de la teneur en sodium dans les percolats, lorsque la dose de nickel augmente, n'est pas retrouvée dans les tiges et feuilles et n'a pas empêché une immobilisation déficiente en sodium. Les mêmes observations entre le nickel et le sodium ont été faites sur la laitue par Heikal *et al.* (1989).

Si on suppose que la diminution de la teneur en éléments avec l'augmentation de la taille du plant est aussi valable pour les oligo-éléments, alors la baisse importante de la teneur en manganèse dans les tiges et feuilles, surtout dans le deuxième essai, lorsque la dose de nickel augmente, va à l'encontre de ce processus (cf. figure 9). En outre, il n'y a pas d'effet sur la teneur en manganèse dans les percolats qui aurait pu expliquer cette baisse. Cela pourrait donc être la preuve d'un véritable antagonisme entre l'absorption du nickel et celle du manganèse. Cependant, même aux apports importants de nickel, les teneurs en manganèse dans les tiges et feuilles des plants ne semblent pas déficientes.

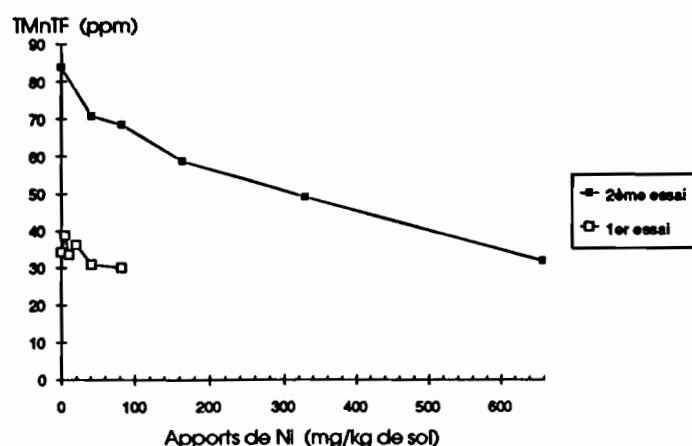


Fig. 9. Teneurs en manganèse dans les tiges et feuilles sèches en fonction des apports de Ni.

Il est probable que la baisse de la taille des plants dans le deuxième essai, lorsque la dose de nickel augmente, ait contribué à l'augmentation de la teneur en nickel dans les tiges et feuilles (cf. figure 10). Toutefois, les teneurs croissantes en nickel dans les percolats ont très certainement joué un rôle déterminant dans cette augmentation. En effet, l'observation de la figure 11 révèle que les teneurs en nickel dans les tiges et feuilles sont, d'une part, relativement proches des teneurs en nickel dans les percolats, et augmentent, d'autre part, à peu près aussi vite dans les deux essais, contrairement à la figure 10. Ceci laisse à penser une nouvelle fois que la teneur en nickel dans les tiges et feuilles, donc la toxicité, dépend essentiellement de la teneur en nickel dans la solution du sol, et non de la teneur totale dans le sol.

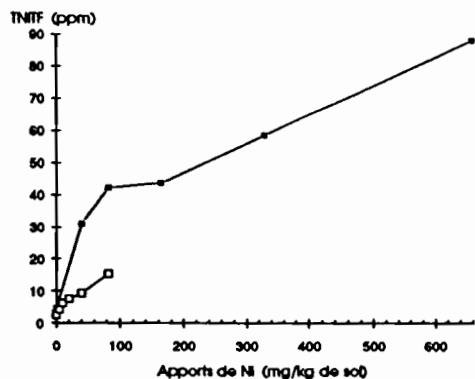


Fig. 10. Teneurs en nickel dans les tiges et feuilles sèches en fonction des apports de Ni.

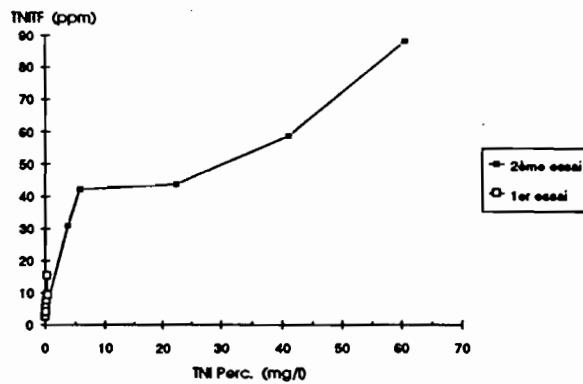


Fig. 11. Teneurs en nickel dans les tiges et feuilles sèches en fonction des teneurs en Ni dans les percolats.

De plus, la figure 12 en page suivante montre que la quantité de nickel en solution est bien supérieure à la quantité de nickel immobilisée dans les tiges et feuilles. Même si le compartiment racine n'est pas considéré, on peut raisonnablement dire que la quantité de nickel présente dans la solution du sol est largement suffisante pour engendrer à elle seule la quantité de nickel présente dans le maïs. Cela rend l'hypothèse précédente d'autant plus crédible.

Les figures 10 et 11 nous permettent de constater un ralentissement de l'augmentation de la teneur en nickel dans les tiges et feuilles à partir de la dose 3 dans le deuxième essai. Il correspond à un ralentissement de l'absorption de nickel par le maïs, qui se répercute par une diminution de la quantité de nickel immobilisée dans les tiges et feuilles (cf. figures 12 et 13). La figure 13 montre qu'au delà de la dose 4 du deuxième essai (1961 mg de Ni/pot), l'immobilisation est presque constante. Ainsi, la dose 3 dans le deuxième essai (368 mg NiSO₄/kg de sol) semble constituer un seuil, avant lequel l'absorption de nickel par le maïs augmente régulièrement, et au delà duquel l'absorption de nickel diminue.

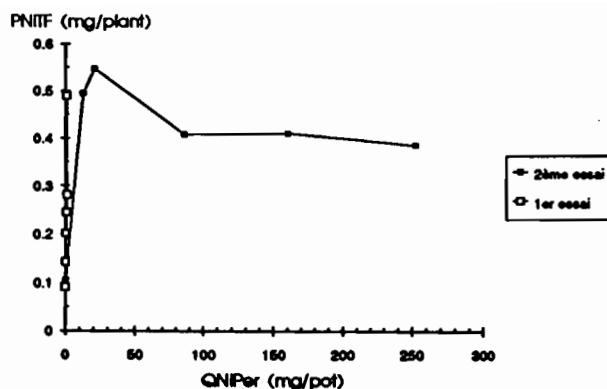


fig. 12. Quantités de nickel immobilisées dans les tiges et feuilles en fonction des quantités totales de nickel dans les percolats.

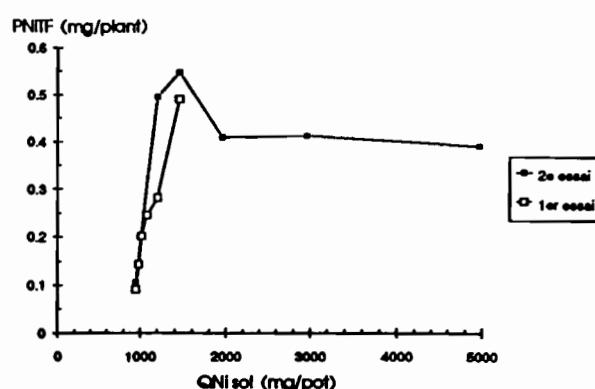


fig. 13. Quantités de nickel immobilisées dans les tiges et feuilles en fonction des quantités totales de nickel dans le sol.

L'action毒ique du nickel semble être due à un effet ionique spécifique et direct, et non pas à un effet induit. En effet, le nickel présent dans les percolats se trouve très probablement sous forme ionique Ni^{2+} , ce qui suggère fortement, étant donnée l'hypothèse précédente, que le nickel est absorbé par le maïs sous cette forme. Par ailleurs, aucune véritable carence en élément majeur ou en oligo-éléments, même en azote, en sodium ou en manganèse, n'a été induite par les fortes doses de nickel. De même, le potentiel hydrique de la plante ne semble pas avoir été affecté puisque la teneur en eau de la plante est quasiment constante en fonction des doses de nickel. L'alimentation en eau du maïs ne semble donc pas affectée. Cependant, l'observation du paramètre ETPc/PP36 dans le deuxième essai (cf. tableau 4, l'annexe 7), définissant l'évapotranspiration relative par gramme de matière végétale, montre que les plants qui ont reçu les fortes doses de nickel ont une consommation relative en eau beaucoup plus élevée que les autres. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que la plante répondrait à un stress - constitué par les quantités élevées de nickel dans le milieu - en consommant plus d'eau, de manière à soutenir sa croissance et lutter contre cette agression.

4.5.2. Teneurs toxiques du nickel dans les tiges et feuilles sèches

Les premiers symptômes de toxicité sont observés à partir de la dose 2 dans le deuxième essai (184 mg de NiSO_4 /kg de sol), ce qui correspond à une teneur en nickel dans les tiges et feuilles de 30,83 ppm.

La dose 6 dans le premier essai (368 mg de NiSO_4 /kg de sol), correspondant à une teneur en nickel dans les tiges et feuilles de 15,33 ppm, n'induit aucune toxicité.

Ainsi, le seuil de toxicité du nickel dans les tiges et feuilles sèches est compris entre 15,33 et 30,83 ppm.

La comparaison des deux essais nous permet de constater que les doses communes de sulfate de nickel (184 et 368 mg/kg de sol) engendrent des teneurs en nickel dans les tiges et feuilles plus fortes dans le deuxième essai que dans le premier (30,83 et 42,17 ppm contre 9,33 et 15,33 ppm). Ces différences sont très certainement dues à celles constatées sur les teneurs en nickel dans les percolats,

ce qui rejoint et renforce l'hypothèse selon laquelle l'absorption du nickel par le maïs et la toxicité sont essentiellement dépendantes de la quantité de nickel présente dans la solution du sol.

4.6. Bilan

Le tableau 9 qui suit fait un bilan de la répartition du nickel dans les différents compartiments : le sol initial ainsi que les apports de nickel, les tiges et feuilles et les percolats à la récolte.

On constate que le nickel est un élément faiblement absorbé par la plante et très peu soluble. Néanmoins, le nickel apporté sous forme de sulfate est beaucoup plus soluble que le nickel présent naturellement dans le sol, puisque les quantités relatives de nickel solubilisées augmentent avec l'apport de NiSO_4 . Le nickel présent initialement est donc probablement piégé dans le sol ou/et sous une forme chimique très peu soluble, alors que le nickel apporté passe en partie en solution, l'autre partie étant fixée sur le sol sous une forme plus ou moins échangeable qu'il serait important de déterminer.

Tableau 9. Répartition du nickel présent initialement dans le sol et du nickel apporté, dans les percolats et dans les tiges et feuilles (les valeurs en italique correspondent aux quantités relatives, en %)

| Compartiment | 1 ^{er} essai | | | | | | 2 ^{ème} essai | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| Ni du sol (mg/pot) | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 | 957,7 |
| Ni apporté (mg/pot) | 0 | 31,3 | 62,7 | 125,4 | 250,9 | 501,8 | 0 | 250,9 | 501,8 | 1003,5 | 2007 | 4014,1 |
| Ni total (mg/pot) | 957,7 | 989 | 1020,4 | 1083,1 | 1208,6 | 1459,5 | 957,7 | 1208,6 | 1459,5 | 1961,2 | 2964,7 | 4971,8 |
| PNiTF (mg/plt) (%) | 0,090 | 0,143 | 0,201 | 0,244 | 0,280 | 0,489 | 0,106 | 0,495 | 0,547 | 0,408 | 0,411 | 0,388 |
| | 0,009 | 0,014 | 0,020 | 0,023 | 0,023 | 0,033 | 0,011 | 0,041 | 0,037 | 0,021 | 0,014 | 0,008 |
| QNiPerc. (mg/pot) (%) | 0,140 | 0,262 | 0,352 | 0,837 | 1,578 | 1,004 | 0,400 | 12,728 | 20,814 | 86,358 | 160,306 | 252,610 |
| | 0,015 | 0,026 | 0,035 | 0,077 | 0,131 | 0,069 | 0,042 | 1,053 | 1,427 | 4,404 | 5,406 | 5,081 |
| Ni fixé sur le sol (%) | 99,98 | 99,96 | 99,94 | 99,90 | 99,85 | 99,90 | 99,95 | 98,91 | 98,54 | 95,58 | 94,58 | 94,91 |

Il est possible que les racines jouent un rôle important en tant qu'organe d'accumulation de nickel, et on peut regretter qu'elles n'aient pu être analysées ici (elles étaient trop souillées par le sol pour pouvoir être analysées). Seule une culture hydroponique peut nous permettre d'appréhender leur rôle et leur importance.

4.7. Comparaison avec la bibliographie

Le tableau qui suit présente des résultats notés dans la bibliographie, concernant des teneurs toxiques dans différentes variétés de maïs et dans la solution de culture, et les effets observés correspondants.

Tableau 10. Teneurs toxiques en nickel dans la solution de culture et dans la plante, et effets observés

| Variétés de maïs | Concentrations dans le milieu de culture | Teneurs dans le végétal (organe) (en ppm) | Toxicité (effets observés) | Références |
|------------------|--|---|---|-------------------------|
| - | - | 0,9 - 2,5 (plante) | non | Keeney & Walsh (1975) |
| - | 2 ppm 10 ppm (sur sable) | 12 (feuilles) 246 (feuilles) | non oui (chloroses, retard de croissance) | Soane & Saundar (1959) |
| hybride SR 52 | 0,1 mg/l (en solution) | - | oui (diminution de la croissance en longueur des racines de 50 %) | Robertson (1985) |
| LG 3 | 1 mg/l (en solution) | 30 (tiges et feuilles) 2250 (racines) | oui (diminution du poids sec des tiges et feuilles de 35 % et des racines de 30 % par rapport au témoin) | Gerzabek & Ullah (1990) |

On remarque que les résultats que nous avons obtenu avec l'hybride double GH 5010 sont très proches de ceux obtenus avec les variétés présentées dans le tableau 10.

5. CONCLUSION

Ces deux expérimentations en serre nous ont permis de mettre en évidence un certain nombre de points très importants, énumérés ci-dessous :

1°/ nous avons pu constater le très grand pouvoir de fixation du nickel sur le sol de l'essai. En effet, pour un apport de nickel (sous forme de sulfate) de 250,9 mg/pot (41,13 ppm), seulement 1,58 mg restent en solution dans le premier essai, soit environ 0,63 % .

2°/ cependant, l'environnement chimique dans lequel se trouve le nickel influe beaucoup sur sa fixation. En effet, dans le deuxième essai, dans lequel les quantités de SO_4^{2-} , de NO_3^- et de NH_4^+ sont plus importantes que dans le premier essai, 12,73 mg de nickel restent en solution pour le même apport de 250,9 mg/pot (environ 5,1 %), soit 8 fois plus.

Si le nickel soluble est la principale forme absorbée par la plante, on peut se demander dans quelle mesure certains éléments, comme Ca^{2+} , Mg^{2+} ou des anions, peuvent favoriser le passage en solution d'ions Ni^{2+} - en les déplaçant de leurs sites de fixation ou par attraction ionique - et rendre ainsi le nickel plus toxique. L'influence des fertilisations et des amendements sur la solubilisation et le pouvoir toxique du nickel est donc à déterminer, surtout sur les sols ferrallitiques du Sud du Territoire à fortes teneurs en nickel.

3°/ de nombreux indices laissent à penser que c'est effectivement le nickel en solution qui est principalement absorbé par la maïs. Le meilleur argument qui soutient cette hypothèse est le suivant : pour des apports de nickel identiques entre les deux essais, d'une part, le nickel est davantage en solution dans le deuxième essai, d'autre part, la toxicité apparaît uniquement dans le deuxième essai. Ainsi, la teneur totale en nickel dans le sol n'est pas toujours révélatrice d'un niveau de toxicité, mais il semble plutôt que ce soit la teneur en nickel dans la solution du sol qui importe, et le passage de l'un à l'autre dépendrait beaucoup des caractéristiques, en particulier chimiques, du sol.

4°/ la toxicité apparaît à partir de la dose 2 dans le deuxième essai (184,1 mg de NiSO_4 /kg de sol, soit 41,13 ppm de Ni). Celle-ci a entraîné :

- une teneur en Ni dans les tiges et feuilles sèches de 30,8 ppm ;
- une teneur dans les percolats de 3,81 mg/l (64,9 $\mu\text{mole/l}$) ;
- un ralentissement de la croissance du maïs, représenté notamment par : par rapport au témoin au 36ème jour, une hauteur totale inférieure de 11,4 % et un poids de matière sèche totale inférieure de 31,1 % .

Nous avons ainsi pu mettre en évidence un certain nombre de seuils toxiques pour la croissance et le développement du maïs. Le seuil de toxicité est compris :

- entre 15,3 et 30,8 ppm de Ni dans les tiges et feuilles sèches du maïs ;
- entre 0,45 et 3,81 mg/l (7,66 et 64,9 $\mu\text{mole/l}$) dans la solution du sol (percolats).

Toutefois, ce dernier seuil en solution a été précisé par l'expérimentation annexe en culture hydroponique (cf. annexe 8) : la mesure de la longueur des racines et de la hauteur des coléoptiles montre que leur croissance est nettement ralentie à partir de 1,76 mg/l de Ni (30 $\mu\text{mole/l}$), et que le seuil de toxicité du nickel en solution est compris entre 1,17 et 1,76 mg/l (entre 20 et 30 $\mu\text{mole/l}$).

Par rapport à ce que nous avons pu lire dans la littérature, la réponse du maïs (hybride double GH 5010) au nickel semble assez représentative d'un ensemble d'espèces végétales et même de variétés de maïs. En effet, d'une façon générale, le nickel est toxique lorsque sa teneur dans les tiges et feuilles sèches est supérieure à quelques dizaines de ppm environ l'espèce, et lorsque sa teneur en solution est supérieure à quelques mg/l environ. Le maïs (GH 5010) n'est donc pas une espèce particulièrement sensible ou tolérante à un excès de nickel.

5°/ Il semblerait que le nickel diminue l'absorption de l'azote, du sodium et du manganèse. Cependant, les teneurs en ces éléments dans les tiges et feuilles n'apparaissent pas déficientes, même quand les apports de nickel sont importants. Ainsi, l'action toxique du nickel semble être due à un effet ionique spécifique et direct, et non pas à un effet induit.

6°/ Plusieurs symptômes visuels sont associés à cette toxicité : des racines primaires peu développées, une nécrose de l'extrémité des jeunes feuilles, souvent du bord, allant jusqu'à une nécrose complète du limbe.

L'ensemble de ces résultats soulèvent un certain nombre de questions essentielles auxquelles il nous semble important de répondre :

- quelles sont les seuils de toxicité pour d'autres espèces végétales (dans la plante, dans la solution du sol ou dans le sol), leurs symptômes de toxicité, et est-ce que le nickel en solution est à nouveau la principale forme absorbée ? ;

- quelles sont les fractions solubles, échangeables et non échangeables dans les sols ferrallitiques, et existe-t'il des conditions susceptibles de faire varier les équilibres entre ces fractions ? ;

- quelle est l'influence des apports d'engrais, en particulier du calcium et du magnésium, sur la disponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques, et sur son absorption par la plante ? ;

- quelle est l'influence des variations du pH du sol sur sa mise en solution et son absorption ? ;

- le nickel peut-il induire, à terme, ou chez certaines espèces, des carences en azote, en sodium, ou en manganèse ? ;

- quels sont les effets à long terme du nickel sur la floraison et la fructification ? ;

- enfin, les très fortes teneurs en nickel dans les sols ferrallitiques du Sud (environ 1%, soit 10 000 ppm) sont-elles toxiques pour les plantes cultivées ? Si elles ne le sont pas ou peu, existe-t'il des conditions susceptibles d'augmenter la disponibilité du nickel et les risques de toxicité ? Par contre, si elles sont toxiques, quels sont les moyens d'y remédier ?.

BIBLIOGRAPHIE

Gerzabek M. H. and S. M. Ullah. 1990. Influence of fulvic and humic acids on Cd- and Ni-toxicity to *Zea mays* (L.). *Die bodenkultur*, Vol. 41, N°2, p.115-124.

Heikal M.M.D., W.L. Berry and A. Wallace. 1989. Interactions in plant growth response between the osmotic effect of sodium chloride and high concentration of the trace element nickel. *Soil Science*, Vol. 147, N° 6, p. 422-425.

Keeney D.R. et L.M. Walsh. 1975. Heavy metal availability in sewage sludge amended soils. In : *Internat. Conf. on heavy Metals in the Environment, vol 2, Pathways and Cycling* ; (T.C Hutchinson ed), Institute for Environmental Studies, University of Toronto, p. 379-403.

Latham M., P. Quantin et G. Aubert. 1978. Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie, *Notice explicative N° 78*, ORSTOM Paris.

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.

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.

Service de l'Agriculture. Recherche agronomique : activités 1982. 235p.

Soane B. D. et D. H. Saunder. 1959. Nickel and chromium toxicity of serpentine soils in Southern Rhodesia ,*Soil Sci.*, Vol. 88, p. 322-330.

ANNEXES

ANNEXE 1

**ETUDE DE LA FIXATION DU NICKEL
SUR LE SOL ALLUVIAL DE L'ESSAI**

ETUDE DE LA FIXATION DU NICKEL SUR LE SOL ALLUVIAL DE L'ESSAI

1. Objectifs

A la suite du premier essai en serre pour étudier l'influence de fortes doses de nickel sur la croissance du maïs, nous avons constaté après dosage du nickel dans les percolats que la plus grande partie du nickel apporté était fixée sur le sol alluvial de l'essai.

L'objectif de cette étude fut donc de déterminer la quantité de nickel fixée sur le sol en fonction de la quantité apportée.

2. Dispositif expérimental et conduite de l'expérimentation

Pour cela, nous avons apporté des doses croissantes de NiSO_4 au sol alluvial qui a servi de support aux deux expérimentations en serre.

Les doses de NiSO_4 apportées, ainsi que les quantités de Ni correspondantes, sont les suivantes :

| Doses | NiSO_4 (mg/50 g de sol) | Ni (mg/kg de sol) |
|-------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 1,25 | 5,58 |
| 3 | 2,5 | 11,17 |
| 4 | 5 | 22,34 |
| 5 | 10 | 44,68 |
| 6 | 20 | 89,36 |
| 7 | 40 | 178,72 |
| 8 | 80 | 357,44 |
| 9 | 160 | 714,88 |
| 10 | 320 | 1429,76 |
| 11 | 640 | 2859,52 |
| 12 | 1280 | 5719,04 |
| 13 | 2560 | 11438,08 |
| 14 | 5120 | 22876,16 |
| 15 | 10240 | 45752,32 |

Chaque échantillon était constitué par 50 g de sol mis dans des flacons en polyéthylène de 250 ml, au contact de 125 ml de solution de nickel. Pour chaque dose, deux échantillons identiques furent constitués.

Les flacons étaient régulièrement remués. Les solutions furent récupérées 4 jours après à l'aide d'une pipette et données au laboratoire de chimie pour en déterminer les concentrations en nickel. La différence entre la quantité de nickel apportée et la quantité en solution correspond à celle fixée sur le sol.

3. Résultats

Le tableau et la figure 1.1. qui suivent montrent que le nickel se fixe en quantité très importante sur le sol de l'essai. Les 6 premières doses correspondent aux doses appliquées lors de la première expérimentation en serre : on constate que plus de 99 % du nickel apporté lors de l'essai en serre se sont fixés sur le sol.

| Doses | Ni restant dans la solution du sol (mg/l) | Ni fixé (%) |
|-------|---|-------------|
| 1 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 0,00 | 100,00 |
| 3 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 0,05 | 99,44 |
| 5 | 0,05 | 99,72 |
| 6 | 0,19 | 99,47 |
| 7 | 1,17 | 98,36 |
| 8 | 5,53 | 96,13 |
| 9 | 25,34 | 91,14 |
| 10 | 106,35 | 81,40 |
| 11 | 383,95 | 66,43 |
| 12 | 1152,00 | 49,64 |
| 13 | 3012,00 | 34,17 |
| 14 | 6962,50 | 23,91 |
| 15 | 15624,50 | 14,62 |

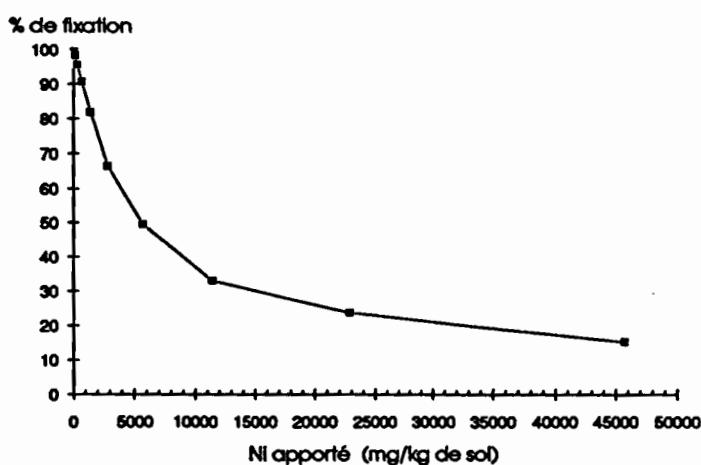


Fig. 1.1. Quantité de nickel fixé sur le sol alluvial de l'essai en fonction de la quantité de nickel apporté.

ANNEXE 2

ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ETAT INITIAL DU SOL DE L'ESSAI

ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'ETAT INITIAL DU SOL ALLUVIAL DE L'ESSAI

| ECHANTILLON | SOL ALLUVIAL |
|-----------------|--------------|
| PROFONDEUR (cm) | 0-25 |

| TEXTURE (%) | |
|--------------------------|------|
| Argile | 12,7 |
| Limon fin | 13,7 |
| Limon Grossier | 11,2 |
| Sable fin | 39,2 |
| Sable Grossier | 22,1 |
| Elément grossier | - |
| Matière organique totale | 1,8 |

| | |
|-------|-------|
| Somme | 100,7 |
|-------|-------|

| EAU DU SOL (%) | |
|----------------|------|
| pF 2.5 | 17,6 |
| pF 3.0 | 14,7 |
| pF 4.2 | 9,5 |

| pH | |
|--------|-----|
| pH eau | 6,1 |
| pH KCl | 5,1 |

| MATIERE ORGANIQUE (mg/g) | |
|--------------------------|------|
| Carbone | 10,6 |
| Azote | 1,07 |
| C/N | 9,9 |

| COMPLEXE D'ECHANGE (mEq/100g) | |
|-------------------------------|------|
| Calcium | 8,53 |
| Magnésium | 7,35 |
| Potassium | 0,32 |
| Sodium | 0,13 |

| | |
|------------------------------|-------|
| Somme des bases échangeables | 16,35 |
|------------------------------|-------|

| | |
|------------------------|--------|
| Capacité d'échange | 15,15 |
| Taux de saturation (%) | 107,90 |

| BASES TOTALES (mEq/100g) | |
|--------------------------|-------|
| Calcium | 39,17 |
| Magnésium | 80,99 |
| Potassium | 6,96 |
| Sodium | 1,39 |

| | |
|-------------------------|--------|
| Somme des bases totales | 128,51 |
|-------------------------|--------|

| P ₂ O ₅ (mg/g) | |
|--------------------------------------|-------|
| Total | 1,50 |
| Assimilable | 0,103 |

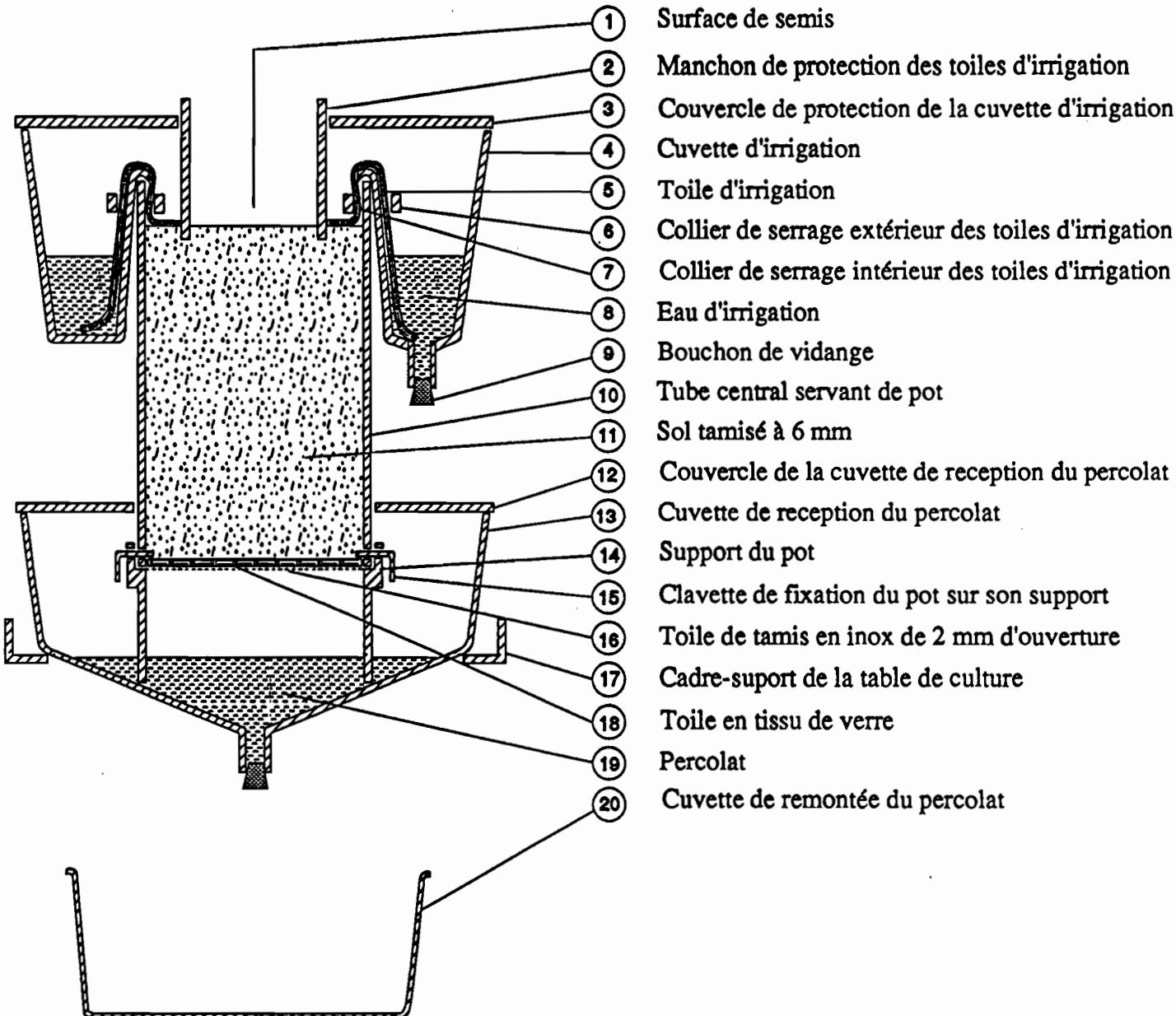
| ELEMENTS TOTAUX (%) | |
|--------------------------------|-------|
| Perte au feu | 5,69 |
| Résidu | 52,32 |
| SiO ₂ | 21,26 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,20 |
| Al ₂ O ₃ | 8,29 |
| MnO ₂ | 0,13 |
| TiO ₂ | 0,71 |
| CaO | 1,13 |
| MgO | 1,79 |
| K ₂ O | 0,73 |
| Na ₂ O | 0,07 |
| NiO | 0,02 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,03 |
| CoO | 0,01 |
| CuO (mg/g) | 0,05 |

| NICKEL EXTRACTIBLE (DTPA) (ppm) | |
|---------------------------------|------|
| NiE (ppm) | 10,7 |

ANNEXE 3

COUPE SCHEMATIQUE D'UN VASE DE VEGETATION

COUPE SCHEMATIQUE D'UN VASE DE VÉGÉTATION



ANNEXE 4

APPORTS DE SOLUTION NUTRITIVE COMPLETE ET DE NiSO₄
LORS DU PREMIER ESSAI
ET LORS DU DEUXIEME ESSAI

SOLUTION NUTRITIVE COMPLETE ET APPORTS DE NiSO₄ POUR LE MAIS LORS DE LA PREMIERE EXPERIMENTATION

Pour les calculs des quantités d'éléments apportées par pot et par hectare, nous avons considéré les données suivantes :

- un hectare représente 2500 m³ de sol (100 m * 100 m * 0,25 m);
- un pot peut recevoir un volume de sol de 4,68 litres (25 cm de haut et 15,45 cm de diamètre).

| 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 jour | 20 ^e jour | N | P | K | Ca | Mg | S | B | Cu | Zn | Mo |
| NH ₄ NO ₃ | 24,79 | - | 15 | 15 | 260,1 | | | | | | | | | |
| K ₂ HPO ₄ | 24,22 | 10 | 10 | 10 | | 129,2 | 326,1 | | | | | | | |
| KNO ₃ | 4,57 | 10 | 10 | 10 | 19 | | 53 | | | | | | | |
| 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 | 1,12 | 10 | 10 | - | | | | | | 3,92 | | | | |
| CuSO ₄ .5H ₂ O | 1,76 | 10 | 10 | - | | | | | | 4,52 | | 8,96 | | |
| ZnSO ₄ .7H ₂ O | 1,35 | 10 | 10 | - | | | | | | 3,01 | | | 6,14 | |
| (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O | 0,09 | 10 | 10 | - | 0,12 | | | | | | | | | 0,98 |
| Quantités totales d'éléments apportées: en mg/pot de 4,68 l. en équivalent kg/ha | | | | 565,2 | 129,2 | 379,1 | 204,6 | 124,1 | 7,53 | 3,92 | 8,96 | 6,14 | 0,98 | |
| | | | | 301,9 | 69 | 202,5 | 109,3 | 66,3 | 4,02* | 2,10 | 4,78 | 3,28 | 0,52 | |

* La quantité de S habituellement apportée est d'environ 87 kg/ha. Mais étant donné que le nickel est apporté sous forme de sulfate, la quantité de S varie selon la dose de NiSO₄ apportée. Afin de maintenir une quantité de sulfate constante, différents apports de (NH₄)₂SO₄ sont réalisés, le niveau d'azote étant ensuite corrigé par différents apports de NH₄NO₃.

Ce tableau tient compte de la correction Mg/Ca effectué le 11/04, c'est à dire au 8^eme jour. Lors des 8 premiers jours d'expérimentation la quantité de Ca était de 62,9 mg/pot, alors qu'après correction de ce rapport elle est maintenant de 204,6 mg/pot.

Les tableaux suivants indiquent les doses de NiSO_4 , de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et de NH_4NO_3 appliquées :

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot 15 jours avant le semis | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--|-------|--------|--------|--------|----|-------|-------|-------|--------|--------|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | Ni | | | | | | S | | | | | |
| $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 0 | 2,81 | 5,615 | 11,23 | 22,46 | 44,92 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | 0 | | 31,36 | 62,72 | 125,45 | 250,90 | 501,80 | 0 | 17,12 | 34,25 | 68,51 | 137,03 | 274,06 | |
| | | | | | 0 | | 16,75 | 33,50 | 67,01 | 134,02 | 268,05 | 0 | 9,14 | 18,29 | 36,59 | 73,20 | 146,40 | |

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot au semis | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|---|--------|--------|----|--------|--------|--------|--------|--------|----|----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | N | | | | | | S | | | | | |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 22,60 | 21,18 | 19,76 | 16,94 | 11,30 | 0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | 239,45 | 224,40 | 209,36 | 179,48 | 119,72 | 0 | 274,06 | 256,94 | 239,81 | 205,55 | 137,03 | 0 | | |
| | | | | | 127,91 | 119,87 | 111,84 | 95,97 | 63,95 | 0 | 146,40 | 137,26 | 128,11 | 109,81 | 73,20 | 0 | | |

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantité d'azote apporté par 50 ml appliqués à chaque pot au semis | | | | | |
|---|------------------------------------|------|------|------|------|------|--|-------|-------|--------|--------|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| NH_4NO_3 | 0 | 0,86 | 1,71 | 3,42 | 6,85 | 13,7 | | | | | | |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | 0 | | 15,05 | 30,09 | 59,97 | 119,73 | 239,45 | |
| | | | | | 0 | | 8,04 | 16,07 | 32,04 | 63,96 | 127,91 | |

Bilan pour N et S : par la correction apportée par les deux derniers tableaux, tous les pots reçoivent la même quantité d'azote et de soufre, c'est à dire :

| | N | S |
|--------|---------------------------|--------------------------|
| mg/pot | $565,2 + 239,45 = 804,65$ | $7,53 + 274,06 = 281,41$ |
| kg/ha | $301,9 + 127,91 = 429,81$ | $4,02 + 146,40 = 150,42$ |

Soit un total de S, pour tous les pots de $150,42 \text{ kg/ha} = 0,313 \text{ méq de } \text{SO}_4^{2-} /100\text{g}$.

SOLUTION NUTRITIVE COMPLETE ET APPORTS DE NiSO₄ POUR LE MAIS LORS DE LA DEUXIEME EXPERIMENTATION

Pour les calculs des quantités d'éléments apportées par pot et par hectare, nous avons considéré les données suivantes :

- un hectare représente 2500 m³ de sol (100 m * 100 m * 0,25 m);
- un pot peut recevoir un volume de sol de 4,68 litres (25 cm de haut et 15,45 cm de diamètre).

| 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 jour | 20 ^e jour | N | P | K | Ca | Mg | S | B | Cu | Zn | Mo |
| K ₂ HPO ₄ | 24,22 | 10 | 10 | 10 | | 129,2 | 326,1 | | | | | | | |
| KNO ₃ | 4,57 | 10 | 10 | 10 | 19 | | 53 | | | | | | | |
| 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 | 1,12 | 10 | 10 | - | | | | | | | 3,92 | | | |
| CuSO ₄ , 5H ₂ O | 1,76 | 10 | 10 | - | | | | | | 4,52 | | 8,96 | | |
| ZnSO ₄ , 7H ₂ O | 1,35 | 10 | 10 | - | | | | | | 3,01 | | | 6,14 | |
| (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ , 4H ₂ O | 0,09 | 10 | 10 | - | 0,12 | | | | | | | | | 0,98 |
| Quantités totales d'éléments apportées: en mg/pot de 4,68 l. en équivalent kg/ha | | | | | 305,1 | 129,2 | 379,1 | 204,6 | 124,1 | 7,53 | 3,92 | 8,96 | 6,14 | 0,98 |
| | | | | | 163,9 | 69 | 202,5 | 109,3 | 66,3 | 4,02* | 2,10 | 4,78 | 3,28 | 0,52 |

* La quantité de S habituellement apportée est d'environ 87 kg/ha. Mais étant donné que le nickel est apporté sous forme de sulfate, la quantité de S varie selon la dose de NiSO₄ apportée. Afin de maintenir une quantité de sulfate constante, différents apports de (NH₄)₂SO₄ sont réalisés, le niveau d'azote étant ensuite corrigé par différents apports de NH₄NO₃.

Les tableaux suivants indiquent les doses de NiSO_4 , de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et de NH_4NO_3 appliquées :

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot 15 jours avant le semis | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--|-------|-------|--------|--------|--------|----|-------|-------|-------|--------|--------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | Ni | | | | | | S | | | | | |
| $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 0 | 22,46 | 44,91 | 89,81 | 179,62 | 359,25 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | | | 0 | 250,9 | 501,8 | 1003,5 | 2007,0 | 4014,1 | 0 | 137,0 | 274,0 | 548,0 | 1096,1 | 2192,1 |
| | | | | | | | 0 | 134,0 | 268,0 | 536,1 | 1072,2 | 2144,3 | 0 | 73,2 | 146,4 | 292,8 | 585,5 | 1171,0 |

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantités d'éléments apportés par 50 ml appliqués à chaque pot au semis | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|--------|--------|--------|------|----|---|--------|--------|--------|-------|----|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | N | | | | | | S | | | | | |
| $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ | 180,72 | 169,42 | 158,13 | 135,54 | 90,4 | 0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | | | 1914,7 | 1795,0 | 1675,4 | 1434,1 | 957,8 | 0 | 2192,1 | 2055,1 | 1918,1 | 1644,1 | 1096,5 | 0 |
| | | | | | | | 1022,8 | 958,9 | 895,0 | 767,1 | 511,6 | 0 | 1171,0 | 1097,8 | 1024,6 | 878,2 | 585,7 | 0 |

| Produit | Concentration de la solution (g/l) | | | | | | Quantité d'azote apportée par 50 ml appliquée à chaque pot au semis | | | | | |
|---|------------------------------------|------|-------|-------|-------|--------|---|--------|--------|--------|--------|---------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
| NH_4NO_3 | 0 | 6,84 | 13,68 | 27,37 | 54,74 | 109,48 | | | | | | |
| Quantités totales d'éléments apportées en mg/pot de 4,681 en équivalent kg/ha | | | | | | | 0 | 119,73 | 239,34 | 478,68 | 956,94 | 1914,73 |
| | | | | | | | 0 | 63,96 | 127,85 | 255,70 | 511,18 | 1022,83 |

Bilan pour N et S : par la correction apportée par les deux derniers tableaux, tous les pots reçoivent la même quantité d'azote et de soufre, c'est à dire :

| | N | S |
|--------|-----------------------------|---------------------------|
| mg/pot | $305,1 + 1914,73 = 2219,83$ | $7,53 + 2192,1 = 2199,63$ |
| kg/ha | $163 + 1022,83 = 1185,83$ | $4,02 + 1171 = 1175,02$ |

Soit un total de S, pour tous les pots de 1175,02 kg/ha = 2,443 méq de SO_4^{2-} /100g.

ANNEXE 5

DONNEES CLIMATIQUES

DONNEES CLIMATIQUES

Cette annexe présente les données climatiques rencontrées au cours des deux essais en serre, qui se sont déroulés aux dates suivantes :

- du 2/4/91 au 6/5/91 pour le premier ;
- du 17/5/91 au 20/6/91 pour le second.

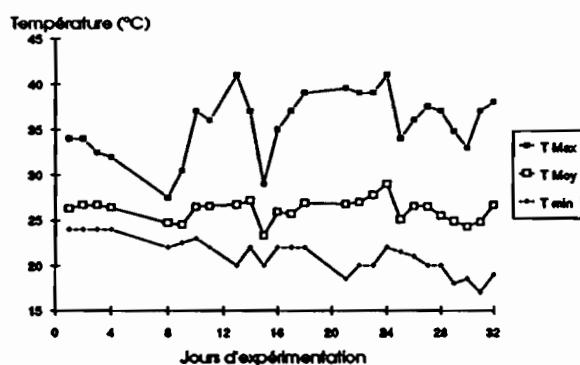


Fig. 5.1. Variation journalière de la température au cours du premier essai.

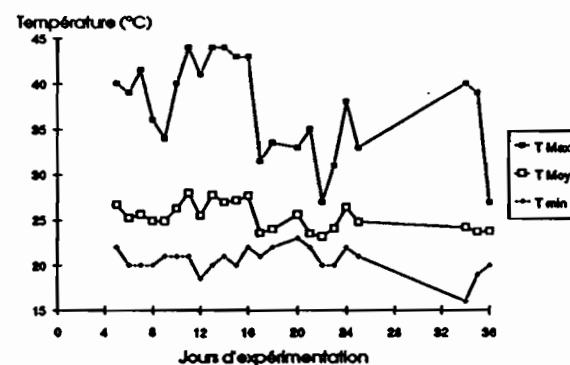


Fig. 5.2. Variation journalière de la température au cours du deuxième essai.

Tableau 5.1. Variations maximales de la température et de l'humidité pendant le jour et la nuit au cours des deux essais

| Paramètres | | 1 ^{er} essai | 2 ^{ème} essai |
|------------------------------|------|-----------------------|------------------------|
| Températures extrêmes (°C) : | jour | 27 à 40 | 27 à 43 |
| | nuit | 17 à 24 | 16 à 23 |
| Humidité (%) : | jour | 30 à 64 | 30 à 60 |
| | nuit | 80 à 86 | 78 à 88 |

La quantité de lumière qu'ont reçue les plants a été à peu près constante au cours des deux essais, soit environ 12 h/jour.

ANNEXE 6

RECAPITULATIFS DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DU PREMIER ESSAI

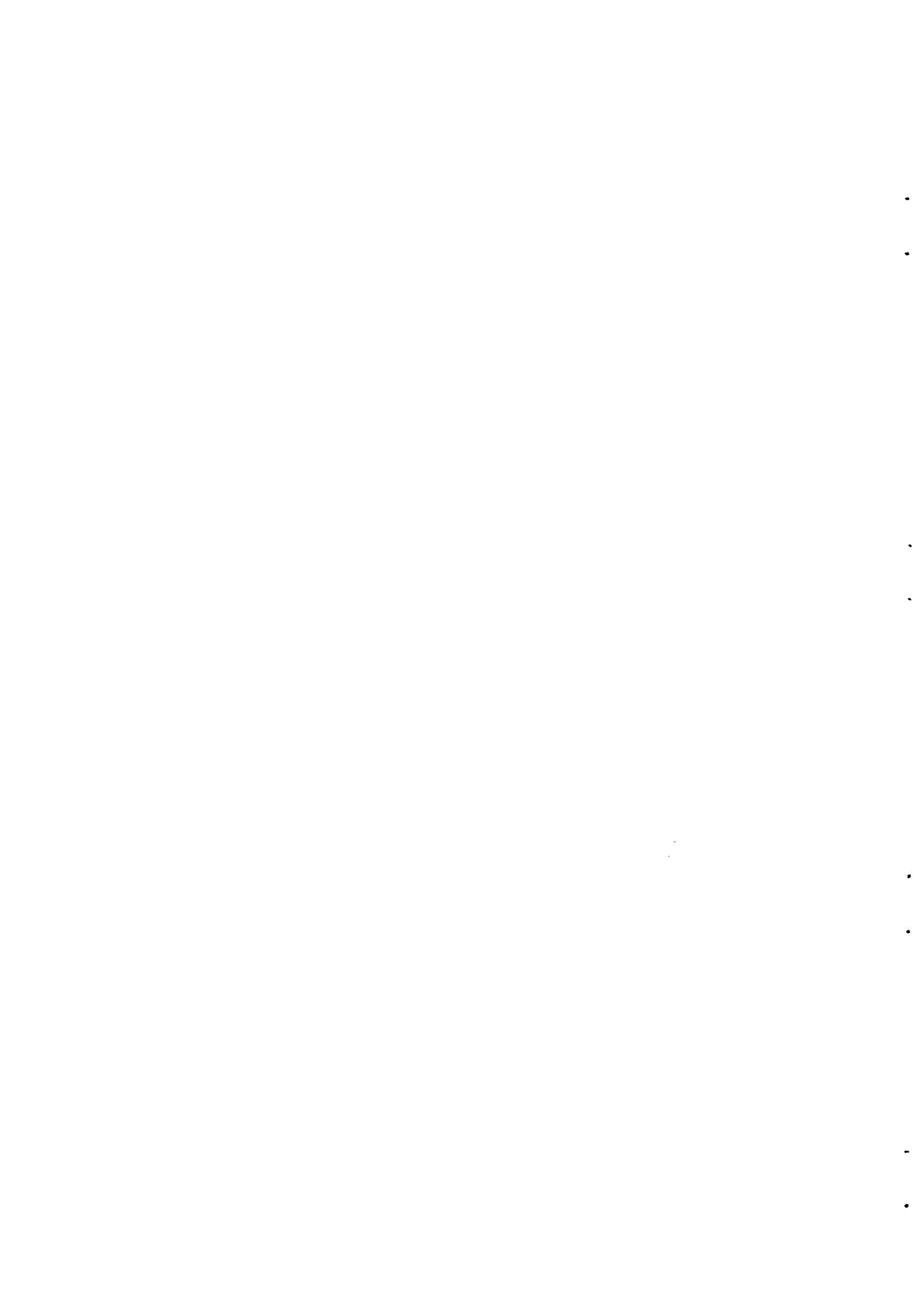


TABLEAU 6.1. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (1^{er} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184,1) | D6 (368,2) | |
| ETPh2 | ml/h | 0,993 | 17,52 | 0,9652 | 0,2467 | 1,000 | 0,923 | 0,983 | 1,067 | 0,953 | 1,030 | |
| ETPh5 | ml/h | 0,988 | 11,04 | 0,9998 | 0,2573 | 1,005 | 0,997 | 1,006 | 0,920 | 1,004 | 0,994 | |
| ETPh9 | ml/h | 1,784 | 10,10 | 0,9871 | 0,8675 | 1,759 | 1,800 | 1,689 | 1,845 | 1,691 | 1,924 | |
| ETPh12 | ml/h | 1,944 | 11,49 | 0,9581 | 0,1928 | 1,970 | 1,943 | 1,913 | 2,025 | 1,888 | 1,926 | |
| ETPh14 | ml/h | 4,633 | 13,56 | 0,7430 | 0,3135 | 4,745 | 4,759 | 4,545 | 4,915 | 4,406 | 4,429 | |
| ETPh16 | ml/h | 4,785 | 13,19 | 0,7704 | 0,6771 | 5,007 | 5,046 | 4,663 | 5,146 | 4,432 | 4,417 | |
| ETPh19 | ml/h | 7,940 | 14,11 | 0,6637 | 0,4807 | 8,265 | 8,406 | 7,792 | 8,377 | 7,470 | 7,332 | |
| ETPh21 | ml/h | 9,867 | 14,78 | 0,7453 | 0,3121 | 10,463 | 10,492 | 9,688 | 10,226 | 9,191 | 9,142 | |
| ETPh23 | ml/h | 14,194 | 14,57 | 0,7676 | 0,2745 | 15,136 | 15,220 | 13,795 | 14,543 | 13,290 | 13,182 | |
| ETPh26 | ml/h | 12,644 | 14,76 | 0,3732 | 0,3382 | 13,105 | 13,808 | 12,321 | 12,704 | 11,841 | 12,086 | |
| ETPh30 | ml/h | 15,420 | 12,43 | 0,1449 | 0,8655 | 16,456 | 16,974 | 15,345 | 14,637 | 14,299 | 14,807 | |
| ETPh33 | ml/h | 18,177 | 14,62 | 0,8106 | 0,4200 | 18,337 | 19,672 | 17,603 | 17,927 | 16,881 | 18,640 | |
| H9 | cm | 10,046 | 6,89 | 0,9119 | 0,7496 | 10,200 | 10,218 | 10,267 | 10,542 | 9,708 | 10,133 | |
| H12 | cm | 12,883 | 7,02 | 0,6848 | 0,2913 | 13,388 | 13,037 | 13,042 | 13,392 | 12,750 | 12,775 | |
| H14 | cm | 15,036 | 7,50 | 0,6936 | 0,4226 | 15,545 | 15,509 | 15,350 | 15,675 | 14,858 | 14,708 | |
| H16 | cm | 17,178 | 7,06 | 0,8109 | 0,3949 | 17,933 | 17,518 | 17,592 | 17,825 | 16,875 | 16,800 | |
| H19 | cm | 21,885 | 6,51 | 0,9428 | 0,3053 | 22,944 | 22,182 | 22,250 | 22,550 | 21,325 | 21,575 | |
| H21 | cm | 26,064 | 6,79 | 0,9663 | 0,3902 | 27,689 | 26,582 | 26,533 | 26,833 | 25,292 | 25,475 | |
| H23 | cm | 31,486 | 7,96 | 0,9633 | 0,3972 | 33,670 | 32,281 | 32,317 | 32,150 | 30,025 | 30,933 | |
| H26 | cm | 44,318 | 6,03 | 0,9707 | 0,9730 | 47,278 | 44,809 | 45,333 | 44,492 | 41,500 | 43,008 | 1>5=6; 3>5 |
| H30 | cm | 62,606 | 7,26 | 0,9593 | 0,9007 | 65,458 | 63,458 | 64,942 | 61,975 | 58,075 | 61,725 | |
| H33 | cm | 75,279 | 7,21 | 0,8992 | 0,9649 | 78,575 | 76,017 | 79,392 | 74,358 | 68,942 | 74,392 | 3=1=2>5 |
| HT33 | cm | 170,701 | 5,30 | 0,9226 | 0,9213 | 174,458 | 172,125 | 176,958 | 169,333 | 160,833 | 170,500 | |
| VT(9,12) | cm/j | 0,946 | 15,78 | 0,8875 | 0,4238 | 1,063 | 0,940 | 0,925 | 0,950 | 1,014 | 0,881 | |
| VT(12,14) | cm/j | 1,076 | 19,54 | 0,4059 | 0,6456 | 1,078 | 1,237 | 1,154 | 1,142 | 1,054 | 0,967 | |
| VT(14,16) | cm/j | 1,071 | 25,12 | 0,2488 | 0,0881 | 1,194 | 1,017 | 1,121 | 1,075 | 1,008 | 1,046 | |
| VT(16,19) | cm/j | 1,569 | 11,32 | 0,9619 | 0,3665 | 1,667 | 1,554 | 1,553 | 1,575 | 1,483 | 1,592 | |
| VT(19,21) | cm/j | 2,090 | 13,57 | 0,8731 | 0,4590 | 2,372 | 2,200 | 2,142 | 2,142 | 1,983 | 1,950 | |
| VT(21,23) | cm/j | 2,711 | 18,49 | 0,8400 | 0,4599 | 3,089 | 2,850 | 2,892 | 2,658 | 2,367 | 2,729 | |
| VT(23,26) | cm/j | 4,277 | 16,69 | 0,6568 | 0,8816 | 4,470 | 4,082 | 4,339 | 4,114 | 3,825 | 4,025 | |
| VT(26,30) | cm/j | 4,572 | 14,47 | 0,7724 | 0,5709 | 4,555 | 4,727 | 4,902 | 4,371 | 4,144 | 4,679 | |
| VT(30,33) | cm/j | 4,225 | 16,46 | 0,2571 | 0,8613 | 4,372 | 4,186 | 4,817 | 4,128 | 3,622 | 4,222 | |

TABLEAU 6.2. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (1^{er} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|------------|---------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184,1) | D6 (368,2) | |
| NF14 | nbr/plt | 3,931 | 5,51 | 0,2272 | 0,6682 | 3,917 | 3,917 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 3,750 | |
| NF19 | nbr/plt | 5,389 | 6,72 | 0,6752 | 0,3838 | 5,250 | 5,417 | 5,583 | 5,417 | 5,250 | 5,417 | |
| NF26 | nbr/plt | 7,125 | 5,72 | 0,4242 | 0,2090 | 7,167 | 7,000 | 7,250 | 7,000 | 7,083 | 7,250 | |
| NF33 | nbr/plt | 8,886 | 3,40 | 0,9337 | 0,3036 | 9,083 | 8,917 | 9,000 | 9,000 | 8,833 | 9,083 | |
| PTFF33 | g/plt | 301,889 | 12,26 | 0,8953 | 0,7812 | 314,583 | 321,167 | 314,917 | 294,917 | 271,458 | 294,292 | |
| PTF33 | g/plt | 32,649 | 12,51 | 0,4935 | 0,8036 | 35,000 | 35,325 | 32,658 | 31,783 | 30,342 | 30,783 | |
| PRac33 | g/plt | 8,127 | 34,14 | 0,4479 | 0,0741 | 7,877 | 8,884 | 8,581 | 8,135 | 8,092 | 7,194 | |
| PP33 | g/plt | 40,776 | 15,54 | 0,4755 | 0,4913 | 42,877 | 44,209 | 41,239 | 39,919 | 38,433 | 37,977 | |
| TCdTF33 | % | 9,831 | 10,64 | 0,4560 | 0,2541 | 10,038 | 9,373 | 9,865 | 9,973 | 9,538 | 10,196 | |
| TSiTF33 | % | 2,045 | 8,84 | 0,9955 | 0,6100 | 2,073 | 2,025 | 2,087 | 2,027 | 1,915 | 2,142 | |
| TNTF33 | % | 1,554 | 16,48 | 0,0939 | 0,4913 | 1,607 | 1,422 | 1,564 | 1,459 | 1,587 | 1,687 | |
| TPTF33 | % | 0,210 | 12,25 | 0,4217 | 0,4777 | 0,224 | 0,211 | 0,219 | 0,198 | 0,204 | 0,206 | |
| TKTF33 | % | 2,990 | 12,18 | 0,3826 | 0,2023 | 3,062 | 2,828 | 3,041 | 2,985 | 2,921 | 3,103 | |
| TCaTF33 | % | 0,287 | 8,54 | 0,9703 | 0,9405 | 0,263 | 0,282 | 0,295 | 0,282 | 0,287 | 0,310 | |
| TMgTF33 | % | 0,347 | 6,09 | 0,9397 | 0,8027 | 0,340 | 0,334 | 0,356 | 0,344 | 0,344 | 0,364 | |
| TNaTF33 | ppm | 24,861 | 24,14 | 0,9617 | 0,9509 | 23,333 | 20,833 | 26,667 | 25,000 | 21,667 | 31,667 | 6>1=5=2 |
| TSTF33 * | % | 0,173 | 0,00 | - | - | 0,167 | 0,169 | 0,174 | 0,199 | 0,171 | 0,157 | |
| TCITF33 | % | 0,272 | 17,06 | 0,7749 | 0,6547 | 0,306 | 0,269 | 0,263 | 0,248 | 0,262 | 0,286 | |
| TFeTF33 | ppm | 115,597 | 28,13 | 0,6239 | 0,6752 | 117,917 | 104,167 | 130,000 | 95,333 | 112,667 | 133,500 | |
| TMnTF33 | ppm | 33,847 | 13,49 | 0,9754 | 0,9723 | 34,083 | 38,667 | 33,333 | 36,167 | 30,833 | 30,000 | 2>3=5=6; 4>5=6 |
| TNiTF33 | ppm | 7,500 | 35,16 | 0,3437 | 1,0000 | 2,583 | 4,000 | 6,167 | 7,583 | 9,333 | 15,333 | 6>5=4=3=2=1 |
| TCrTF33 | ppm | 0,528 | 212,21 | 0,9663 | 0,2638 | 1,000 | 0,667 | 0,000 | 0,500 | 0,333 | 0,667 | |
| TCoTF33 | ppm | 1,472 | 29,17 | 0,9888 | 0,1700 | 1,250 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,583 | |
| TCuTF33 | ppm | 3,806 | 18,72 | 0,3540 | 0,6002 | 3,667 | 3,833 | 4,333 | 3,417 | 3,833 | 3,750 | |
| TZnTF33 | ppm | 25,528 | 16,56 | 0,9997 | 0,9561 | 28,583 | 23,167 | 29,133 | 23,667 | 22,833 | 25,583 | 3=1>4=2=5 |
| PSiTF33 | g/plt | 0,671 | 17,71 | 0,9278 | 0,6321 | 0,726 | 0,720 | 0,685 | 0,647 | 0,587 | 0,661 | |
| PNTF33 | g/plt | 0,506 | 20,81 | 0,2856 | 0,3093 | 0,561 | 0,505 | 0,512 | 0,464 | 0,479 | 0,516 | |
| PPTF33 | g/plt | 0,068 | 17,10 | 0,1144 | 0,9232 | 0,078 | 0,075 | 0,071 | 0,063 | 0,062 | 0,063 | |
| PKTF33 | g/plt | 0,976 | 17,99 | 0,4831 | 0,3998 | 1,070 | 1,005 | 0,990 | 0,950 | 0,886 | 0,954 | |
| PCaTF33 | g/plt | 0,094 | 19,33 | 0,7408 | 0,1569 | 0,092 | 0,100 | 0,097 | 0,090 | 0,088 | 0,097 | |
| PMgTF33 | g/plt | 0,113 | 14,96 | 0,7717 | 0,3443 | 0,119 | 0,118 | 0,116 | 0,109 | 0,105 | 0,113 | |
| PNaTF33 | mg/plt | 0,807 | 28,96 | 0,7399 | 0,7057 | 0,820 | 0,740 | 0,870 | 0,787 | 0,655 | 0,972 | |
| PCITF33 | g/plt | 0,088 | 16,28 | 0,2758 | 0,9883 | 0,107 | 0,094 | 0,085 | 0,078 | 0,078 | 0,084 | 1>3=6=4=5; 2>5 |

* Ce paramètre n'a été dosé que sur des échantillons moyens, ce qui ne permet pas d'effectuer une analyse de variance.

TABLEAU 6.3. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (1^{er} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | Comparaisons des traitements |
|--------------|---------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|----------|----------|----------|------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184,1) | |
| PFeTF33 | mg/plt | 3,750 | 28,53 | 0,4489 | 0,6932 | 4,143 | 3,658 | 4,283 | 2,995 | 3,400 | 4,021 |
| PMnTF33 | mg/plt | 1,097 | 13,49 | 0,5802 | 0,9997 | 1,190 | 1,354 | 1,080 | 1,130 | 0,933 | 0,894 |
| PNiTf33 | mg/plt | 0,241 | 41,34 | 0,4891 | 1,0000 | 0,090 | 0,143 | 0,201 | 0,244 | 0,280 | 0,489 |
| PCrTF33 | mg/plt | 0,017 | 216,67 | 0,9524 | 0,3206 | 0,036 | 0,021 | 0,000 | 0,018 | 0,008 | 0,022 |
| PCoTF33 | mg/plt | 0,047 | 29,95 | 0,9560 | 0,1048 | 0,044 | 0,052 | 0,048 | 0,048 | 0,043 | 0,048 |
| PCuTF33 | mg/plt | 0,124 | 21,52 | 0,2167 | 0,7393 | 0,128 | 0,136 | 0,140 | 0,109 | 0,115 | 0,115 |
| PZnTF33 | mg/plt | 0,835 | 20,43 | 0,9948 | 0,9582 | 0,996 | 0,817 | 0,949 | 0,764 | 0,694 | 0,791 |
| TKmTF33 | meq% | 76,483 | 12,18 | 0,3826 | 0,2023 | 78,326 | 72,336 | 77,785 | 76,352 | 74,719 | 79,381 |
| TCamTF33 | meq% | 14,294 | 8,54 | 0,9703 | 0,9405 | 13,110 | 14,079 | 14,715 | 14,054 | 14,340 | 15,467 |
| TMgmTF33 | meq% | 28,557 | 6,09 | 0,9397 | 0,8027 | 28,023 | 27,481 | 29,285 | 28,297 | 28,311 | 29,943 |
| TNamTF33 | meq% | 0,108 | 24,14 | 0,9617 | 0,9509 | 0,101 | 0,091 | 0,116 | 0,109 | 0,094 | 0,138 |
| BasTF33 | meq% | 119,442 | 8,40 | 0,4137 | 0,4633 | 119,561 | 113,987 | 121,900 | 118,812 | 117,465 | 124,929 |
| PKmTF33 | meq/plt | 24,959 | 17,99 | 0,4831 | 0,3998 | 27,360 | 25,700 | 25,336 | 24,289 | 22,662 | 24,407 |
| PCamTF33 | meq/plt | 4,693 | 19,33 | 0,7408 | 0,1569 | 4,594 | 5,003 | 4,832 | 4,476 | 4,409 | 4,844 |
| PMgmTF33 | meq/plt | 9,331 | 14,96 | 0,7717 | 0,3443 | 9,819 | 9,710 | 9,570 | 8,975 | 8,615 | 9,300 |
| PNamTF33 | meq/plt | 0,035 | 28,96 | 0,7399 | 0,7057 | 0,036 | 0,032 | 0,038 | 0,034 | 0,028 | 0,042 |
| PBasTF33 | meq/plt | 39,019 | 16,15 | 0,5734 | 0,3669 | 41,808 | 40,445 | 39,776 | 37,774 | 35,714 | 38,593 |
| PClmtf33 | meq/plt | 2,478 | 16,28 | 0,2758 | 0,9883 | 3,024 | 2,664 | 2,401 | 2,204 | 2,191 | 2,381 |
| K/BasTF33 | % | 63,868 | 4,64 | 0,7378 | 0,1067 | 65,089 | 63,094 | 63,784 | 64,140 | 63,583 | 63,520 |
| Ca/BasTF33 | % | 12,008 | 9,25 | 0,7566 | 0,6564 | 11,095 | 12,445 | 12,081 | 11,857 | 12,197 | 12,372 |
| Mg/Bastf33 | % | 24,034 | 8,82 | 0,6581 | 0,0047 | 23,731 | 24,381 | 24,040 | 23,912 | 24,140 | 23,999 |
| Na/Bastf33 | % | 0,090 | 19,33 | 0,9959 | 0,9372 | 0,085 | 0,080 | 0,095 | 0,091 | 0,081 | 0,110 |
| Mg/CaTF33 | - | 2,011 | 7,59 | 0,4459 | 0,6740 | 2,142 | 1,964 | 1,994 | 2,022 | 1,993 | 1,949 |
| Mono/BivTF33 | - | 1,795 | 12,91 | 0,8049 | 0,1835 | 1,917 | 1,746 | 1,777 | 1,804 | 1,760 | 1,768 |
| Ca/(Ca+Mg)TF | - | 0,333 | 5,03 | 0,4769 | 0,7072 | 0,318 | 0,339 | 0,334 | 0,332 | 0,335 | 0,340 |
| (K+Na)/CITF | - | 10,244 | 15,13 | 0,8357 | 0,4503 | 9,195 | 10,012 | 10,591 | 11,067 | 10,339 | 10,260 |
| NNiTF33 | - | 2953,145 | 29,33 | 0,3500 | 1,0000 | 6344,306 | 3633,222 | 2617,111 | 2086,227 | 1817,974 | 1220,029 |
| P/NiTF33 | - | 414,044 | 28,79 | 0,6817 | 1,0000 | 895,000 | 544,444 | 371,106 | 288,218 | 235,775 | 149,720 |
| K/NiTF33 | - | 5707,269 | 22,74 | 0,7320 | 1,0000 | 12113,056 | 7155,250 | 5157,614 | 4260,856 | 3359,205 | 2196,937 |
| Ca/NiTF33 | - | 541,095 | 27,81 | 0,7979 | 1,0000 | 1072,361 | 725,389 | 501,487 | 402,269 | 329,069 | 215,995 |
| Mg/NiTF33 | - | 669,705 | 29,44 | 0,6598 | 1,0000 | 1385,139 | 868,111 | 604,690 | 503,819 | 397,627 | 258,841 |
| Na/NiTF33 | - | 4,576 | 26,92 | 0,9495 | 1,0000 | 9,306 | 5,333 | 4,532 | 3,495 | 2,606 | 2,185 |

TABLEAU 6.4. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (1^{er} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|-------------------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184,1) | D6 (368,2) | |
| Cl/NiTF33 | - | 544,515 | 32,72 | 0,6432 | 1,0000 | 1213,889 | 713,889 | 453,069 | 365,741 | 306,005 | 214,500 | 1>2>3=4=5=6 |
| Fe/NiTF33 | - | 22,404 | 37,66 | 0,7029 | 1,0000 | 47,792 | 26,733 | 22,316 | 14,100 | 13,395 | 10,089 | 1>2=3=4=5=6 |
| Mn/NiTF33 | - | 6,878 | 37,31 | 0,7391 | 1,0000 | 13,764 | 10,308 | 5,712 | 5,606 | 3,577 | 2,302 | 1>2>3=4=5=6 |
| Cr/NiTF33 | - | 0,119 | 249,43 | 0,9226 | 0,8167 | 0,417 | 0,167 | 0,000 | 0,056 | 0,048 | 0,030 | |
| Co/NiTF33 | - | 0,270 | 29,91 | 0,9972 | 1,0000 | 0,486 | 0,383 | 0,255 | 0,204 | 0,179 | 0,114 | 1>2>3=4=5=6 |
| Cu/NiTF33 | - | 0,743 | 37,41 | 0,3212 | 1,0000 | 1,472 | 1,017 | 0,747 | 0,500 | 0,447 | 0,273 | 1>2=3=4=5=6 |
| Zn/NiTF33 | - | 5,001 | 28,70 | 0,9899 | 1,0000 | 11,264 | 5,981 | 4,989 | 3,280 | 2,687 | 1,804 | 1>2=3>4=5=6 |
| ETPc/PP33 | ml/g | 154,966 | 10,09 | 0,4032 | 0,7104 | 143,033 | 150,765 | 154,857 | 161,176 | 156,924 | 163,040 | |
| CondPer33 | µS/cm | 435,625 | 25,88 | 0,3624 | 0,4098 | 473,083 | 393,500 | 411,833 | 404,833 | 493,333 | 437,167 | |
| pHPer33 | - | 7,126 | 6,28 | 0,8443 | 0,3828 | 7,220 | 7,120 | 7,287 | 6,859 | 7,218 | 7,051 | |
| THCO ₃ Per33 | meq/l | 1,229 | 77,29 | 0,8240 | 0,0188 | 1,343 | 1,343 | 1,268 | 1,053 | 1,322 | 1,047 | |
| TCIPer33 | meq/l | 0,044 | 46,51 | 0,4784 | 0,4487 | 0,039 | 0,034 | 0,040 | 0,050 | 0,057 | 0,042 | |
| TSO ₄ Per33 | meq/l | 2,422 | 37,54 | 0,2815 | 0,1903 | 2,864 | 2,332 | 2,407 | 2,104 | 2,358 | 2,463 | |
| TNO ₃ Per33 | meq/l | 0,371 | 70,18 | 0,4072 | 0,7951 | 0,301 | 0,213 | 0,290 | 0,359 | 0,545 | 0,519 | |
| TPO ₄ Per33 | mg/l | 1,680 | 73,11 | 0,6110 | 0,7970 | 1,446 | 0,827 | 1,225 | 2,008 | 2,557 | 2,018 | |
| Σ -Per33 | meq/l | 4,065 | 35,85 | 0,6383 | 0,0997 | 4,547 | 3,921 | 4,005 | 3,566 | 4,282 | 4,071 | |
| TCaPer33 | meq/l | 1,895 | 32,96 | 0,4895 | 0,1211 | 2,075 | 1,836 | 1,795 | 1,701 | 2,067 | 1,899 | |
| TMgPer33 | meq/l | 2,153 | 35,65 | 0,4621 | 0,1372 | 2,369 | 1,975 | 2,088 | 1,939 | 2,387 | 2,159 | |
| TKPer33 | meq/l | 0,144 | 56,91 | 0,4427 | 0,8555 | 0,135 | 0,088 | 0,113 | 0,168 | 0,218 | 0,142 | |
| TNaPer33 | meq/l | 0,289 | 34,68 | 0,5782 | 0,3652 | 0,341 | 0,262 | 0,283 | 0,245 | 0,308 | 0,295 | |
| Σ +Per33 | meq/l | 4,482 | 32,34 | 0,4869 | 0,1817 | 4,920 | 4,161 | 4,280 | 4,053 | 4,980 | 4,496 | |
| TFePer33 | mg/l | 0,253 | 165,26 | 0,4658 | 0,6469 | 0,132 | 0,121 | 0,553 | 0,177 | 0,412 | 0,124 | |
| TMnPer33 | mg/l | 0,359 | 153,35 | 0,3615 | 0,1440 | 0,113 | 0,480 | 0,373 | 0,462 | 0,288 | 0,434 | |
| TNiPer33 | mg/l | 0,201 | 102,43 | 0,6274 | 0,9840 | 0,040 | 0,078 | 0,102 | 0,244 | 0,448 | 0,297 | 5>3=2=1; 6>1 |
| TCrPer33 | mg/l | 0,063 | 14,19 | 0,8639 | 0,2496 | 0,063 | 0,060 | 0,065 | 0,067 | 0,063 | 0,060 | |
| TCoPer33 | mg/l | 0,041 | 13,11 | 0,9310 | 0,5610 | 0,045 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,043 | 0,040 | |
| TSiO ₂ Per33 | mg/l | 33,931 | 18,50 | 0,7787 | 0,1723 | 35,333 | 34,083 | 33,167 | 32,833 | 36,333 | 31,833 | |
| Mg/CaPer33 | - | 1,126 | 8,22 | 0,3073 | 0,6403 | 1,142 | 1,046 | 1,156 | 1,132 | 1,149 | 1,130 | |

TABLEAU 6.5. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (1^{er} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|-------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (23) | D3 (46) | D4 (92) | D5 (184,1) | D6 (368,2) | |
| pF2,5r | % | 18,400 | - | - | - | 18,400 | 18,400 | 18,700 | 18,400 | 18,300 | 18,200 | |
| pF3,0r | % | 15,667 | - | - | - | 15,600 | 15,600 | 15,700 | 15,600 | 15,800 | 15,700 | |
| pF4,2r | % | 9,667 | - | - | - | 9,600 | 9,700 | 9,700 | 9,700 | 9,700 | 9,600 | |
| pHH2Or | - | 6,054 | 2,05 | 0,8188 | 0,1545 | 6,050 | 6,042 | 6,050 | 6,025 | 6,117 | 6,042 | |
| pHKClr | - | 5,143 | 1,84 | 0,3547 | 0,8070 | 5,133 | 5,142 | 5,083 | 5,100 | 5,200 | 5,200 | |
| CTr | mg/g | 11,350 | - | - | - | 10,600 | 12,400 | 12,100 | 10,500 | 10,500 | 12,000 | |
| NTr | mg/g | 1,202 | - | - | - | 1,120 | 1,310 | 1,280 | 1,120 | 1,110 | 1,270 | |
| C/Nr | - | 9,444 | - | - | - | 9,464 | 9,466 | 9,453 | 9,375 | 9,459 | 9,449 | |
| CaEr | meq% | 8,673 | - | - | - | 8,610 | 8,760 | 8,570 | 8,670 | 8,590 | 8,840 | |
| MgEr | meq% | 7,187 | - | - | - | 7,270 | 7,180 | 7,240 | 7,140 | 7,120 | 7,170 | |
| KEr | meq% | 0,251 | - | - | - | 0,255 | 0,250 | 0,245 | 0,250 | 0,260 | 0,245 | |
| NaEr | meq% | 0,232 | - | - | - | 0,300 | 0,180 | 0,290 | 0,240 | 0,210 | 0,170 | |
| ΣBEr | meq% | 16,343 | - | - | - | 16,435 | 16,370 | 16,345 | 16,300 | 16,180 | 16,425 | |
| CECr | meq% | 15,867 | - | - | - | 15,950 | 15,650 | 16,050 | 15,850 | 16,100 | 15,600 | |
| ΣBE/CECr | % | 103,017 | - | - | - | 103,041 | 104,601 | 101,838 | 102,839 | 100,497 | 105,288 | |
| Condr | µS/cm | 217,667 | - | - | - | 226,000 | 198,000 | 209,000 | 235,000 | 211,000 | 227,000 | |
| P2O5Asr | mg/g | 0,117 | 11,85 | 0,9786 | 0,4866 | 0,112 | 0,115 | 0,116 | 0,113 | 0,125 | 0,123 | |
| Ni Extract. | ppm | 24,67 | - | - | - | 10,7 | 12,7 | 15,1 | 19,3 | 34,0 | 56,2 | |

ANNEXE 7

RECAPITULATIFS DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DU DEUXIEME ESSAI

TABLEAU 7.1. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (2^{ème} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|------------|---------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (184,1) | D3 (368,2) | D4 (736,4) | D5 (1472,8) | D6 (2945,6) | |
| ETPh9 | ml/h | 1,416 | 9,18 | 0,9988 | 0,9268 | 1,509 | 1,425 | 1,380 | 1,277 | 1,439 | 1,466 | |
| ETPh12 | ml/h | 1,584 | 13,42 | 0,9997 | 0,9296 | 1,809 | 1,678 | 1,544 | 1,508 | 1,476 | 1,488 | |
| ETPh16 | ml/h | 2,086 | 15,70 | 0,9994 | 0,9996 | 2,689 | 2,349 | 2,009 | 1,862 | 1,867 | 1,736 | 1>2=5=4=6; 2>5 |
| ETPh19 | ml/h | 1,873 | 15,15 | 0,9996 | 1,0000 | 2,651 | 2,108 | 1,901 | 1,643 | 1,596 | 1,338 | 1>2=3=4=5=6 |
| ETPh21 | ml/h | 2,481 | 15,39 | 0,9820 | 1,000 | 3,679 | 2,839 | 2,568 | 2,148 | 1,877 | 1,774 | 1>2=3=3=5=6 |
| ETPh23 | ml/h | 2,265 | 18,52 | 0,9255 | 1,0000 | 3,592 | 2,443 | 2,405 | 1,988 | 1,748 | 1,413 | 1>2=3=4=5=6 |
| ETPh26 | ml/h | 3,178 | 19,46 | 0,9937 | 1,0000 | 4,896 | 3,844 | 3,337 | 2,573 | 2,468 | 1,954 | 1>2=3>4=5=6 |
| ETPh28 | ml/h | 4,403 | 22,97 | 0,9015 | 0,9999 | 6,049 | 5,700 | 4,648 | 3,726 | 3,613 | 2,684 | 1>3=4=5=6; 2>4; 3>6 |
| ETPh30 | ml/h | 4,814 | 19,53 | 0,9953 | 1,0000 | 7,514 | 6,153 | 5,352 | 3,706 | 3,550 | 2,611 | 1>2=3>4=5=6 |
| ETPh33 | ml/h | 5,456 | 29,65 | 0,8370 | 0,9999 | 8,060 | 7,293 | 6,135 | 4,403 | 4,086 | 2,758 | 1>3=4=5=6; 2>4; 3>5 |
| ETPh35 | ml/h | 5,696 | 26,15 | 0,9600 | 0,9999 | 7,903 | 7,533 | 6,425 | 4,802 | 4,457 | 3,059 | 1=2>4=5=6; 3>5 |
| ETPh36 | ml/h | 6,747 | 32,60 | 0,5815 | 0,9961 | 8,927 | 8,403 | 7,076 | 6,691 | 5,892 | 3,490 | 1=2=3=4>6; 1>5 |
| H9 | cm | 8,778 | 8,78 | 0,9979 | 0,9581 | 9,192 | 9,375 | 8,750 | 8,775 | 8,700 | 7,875 | 2=1>6 |
| H14 | cm | 13,037 | 9,43 | 0,9828 | 0,9223 | 13,667 | 13,975 | 12,863 | 13,217 | 12,625 | 11,873 | |
| H19 | cm | 17,164 | 5,76 | 0,9981 | 1,0000 | 20,083 | 18,417 | 17,092 | 16,713 | 16,037 | 14,645 | 1>2>3=4=5>6 |
| H23 | cm | 21,493 | 4,70 | 0,9951 | 1,0000 | 25,908 | 23,108 | 21,558 | 20,283 | 20,025 | 18,075 | 1>2>3>4=5>6 |
| H26 | cm | 25,683 | 5,27 | 0,9639 | 1,0000 | 32,342 | 27,500 | 24,850 | 24,754 | 23,358 | 21,292 | 1>2>3=4=5>6 |
| H30 | cm | 32,054 | 6,11 | 0,9928 | 1,0000 | 43,217 | 35,008 | 31,725 | 29,942 | 27,600 | 24,833 | 1>2>3=4>5>6 |
| H33 | cm | 39,389 | 6,90 | 0,9957 | 1,0000 | 56,342 | 43,925 | 38,550 | 36,075 | 32,017 | 28,525 | 1>2>3=4>5>6 |
| H36 | cm | 47,518 | 7,89 | 0,9794 | 1,0000 | 68,067 | 54,533 | 47,533 | 43,108 | 38,950 | 32,917 | 1>2>3>4=5>6 |
| HT36 | cm | 143,028 | 4,70 | 0,9531 | 1,0000 | 176,500 | 156,333 | 145,500 | 138,667 | 128,708 | 112,458 | 1>2>3=4>5>6 |
| VT(9,14) | cm/j | 0,852 | 22,58 | 0,5748 | 0,2366 | 0,895 | 0,920 | 0,823 | 0,888 | 0,785 | 0,799 | |
| VT(14,19) | cm/j | 0,826 | 24,23 | 0,0480 | 0,9999 | 1,283 | 0,888 | 0,846 | 0,699 | 0,683 | 0,555 | 1>2=3=4=5=6 |
| VT(19,23) | cm/j | 1,082 | 12,88 | 0,9426 | 1,0000 | 1,456 | 1,173 | 1,117 | 0,893 | 0,997 | 0,858 | 1>2=3=5=4=6 |
| VT(23,26) | cm/j | 1,397 | 18,79 | 0,8460 | 1,0000 | 2,144 | 1,464 | 1,097 | 1,490 | 1,111 | 1,072 | 1>4=2>5=3=6 |
| VT(26,30) | cm/j | 1,593 | 17,32 | 0,9757 | 1,0000 | 2,719 | 1,877 | 1,719 | 1,297 | 1,060 | 0,885 | 1>2=3>4=5=6 |
| VT(30,33) | cm/j | 2,445 | 15,76 | 0,9671 | 1,0000 | 4,375 | 2,972 | 2,275 | 2,044 | 1,772 | 1,231 | 1>2>3=4=5>6 |
| VT(33,36) | cm/j | 2,710 | 21,52 | 0,2063 | 1,0000 | 3,908 | 3,536 | 2,994 | 2,344 | 2,011 | 1,464 | 1>3=4=5=6; 2>4; 3>5; 4>6 |
| NF23 | nbr/plt | 4,640 | 4,91 | 0,9953 | 1,0000 | 5,000 | 4,917 | 4,917 | 4,333 | 4,375 | 4,300 | 1=2=3>5=4=6 |
| NF35 | nbr/plt | 6,903 | 5,49 | 0,7146 | 1,0000 | 7,917 | 7,333 | 6,917 | 6,583 | 6,417 | 6,250 | 1>2=3=4=5=6 |
| Chloros35 | - | 0,517 | 94,03 | 0,7785 | 0,9995 | 0,333 | 0,167 | 0,167 | 0,183 | 0,750 | 1,500 | 6>5; 5>3=2 |
| Enrac35 | - | 0,851 | 35,89 | 0,9358 | 1,0000 | 0,000 | 0,333 | 0,250 | 0,817 | 1,454 | 2,250 | 6>5>4>2=3=1 |

TABLEAU 7.2. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (2^{ème} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (184,1) | D3 (368,2) | D4 (736,4) | D5 (1472,8) | D6 (2945,6) | |
| PTFF36 | g=plt | 140,972 | 15,36 | 0,9983 | 1,0000 | 264,500 | 179,333 | 146,583 | 109,167 | 88,250 | 58,000 | 1>2>3>4=5>6 |
| PTF36 | g=plt | 12,719 | 18,72 | 0,9978 | 1,0000 | 23,575 | 16,083 | 13,075 | 9,867 | 8,142 | 5,575 | 1>2>3>4=5=6 |
| PRac36 | g=plt | 1,959 | 48,36 | 0,8721 | 0,9997 | 3,637 | 2,656 | 1,654 | 1,943 | 1,298 | 0,566 | 1>4=3=5=6; 2=4>5; 4>6 |
| PP36 | g=plt | 14,678 | 21,60 | 0,9941 | 1,0000 | 27,212 | 18,739 | 14,729 | 11,810 | 9,439 | 6,141 | 1>2>3=4=5=6 |
| TCdTTF36 | % | 14,036 | 7,04 | 0,9920 | 1,0000 | 10,557 | 13,195 | 14,485 | 14,685 | 15,512 | 15,781 | 6=5=4=3>2>1 |
| TSiTTF36 | % | 2,836 | 9,72 | 0,8992 | 0,9991 | 2,308 | 2,792 | 3,063 | 3,006 | 3,032 | 2,814 | 3=5=4=6=2>1 |
| TNTF36 | % | 3,594 | 5,11 | 0,9974 | 0,4985 | 3,483 | 3,564 | 3,688 | 3,648 | 3,582 | 3,598 | |
| TPTF36 | % | 0,223 | 10,26 | 0,9410 | 0,9997 | 0,265 | 0,229 | 0,236 | 0,210 | 0,195 | 0,202 | 1>3=2=4=6=5 |
| TKTF36 | % | 4,675 | 8,99 | 0,9940 | 1,0000 | 3,316 | 4,260 | 4,829 | 4,831 | 5,284 | 5,528 | 6=5=4=3>2>1 |
| TCaTF36 | % | 0,443 | 7,86 | 0,9422 | 0,9999 | 0,374 | 0,407 | 0,440 | 0,471 | 0,481 | 0,487 | 6=5>3=2=1; 4>2; 3>1 |
| TMgTF36 | % | 0,444 | 8,05 | 0,6925 | 0,9986 | 0,440 | 0,398 | 0,413 | 0,452 | 0,468 | 0,494 | 6>1=3=2; 5>3; 4>2 |
| TNaTF36 | ppm | 31,944 | 21,56 | 0,9970 | 0,5842 | 26,667 | 33,333 | 31,667 | 33,333 | 35,000 | 31,667 | |
| TFeTF36 | ppm | 109,847 | 12,35 | 0,8609 | 0,9756 | 109,167 | 103,500 | 107,833 | 124,583 | 117,083 | 96,917 | 4>3=2=6; 5>6 |
| TAjTF36 | ppm | 22,611 | 46,53 | 0,9832 | 0,8864 | 18,333 | 18,000 | 16,333 | 29,417 | 30,250 | 23,333 | |
| TMnTF36 | ppm | 60,431 | 9,45 | 0,0905 | 1,0000 | 83,833 | 70,833 | 68,500 | 58,667 | 49,000 | 31,750 | 1>2=3>4>5>6 |
| TNiTF36 | ppm | 44,778 | 44,10 | 0,7128 | 1,0000 | 4,500 | 30,833 | 42,167 | 43,667 | 58,583 | 87,917 | 6>5=4=3=2>1 |
| TCrTF36 | ppm | 0,347 | 203,70 | 0,9736 | 0,0812 | 0,167 | 0,250 | 0,417 | 0,417 | 0,250 | 0,583 | |
| TCoTF36 | ppm | 2,639 | 14,57 | 0,9022 | 0,9837 | 2,167 | 2,500 | 2,833 | 2,583 | 2,750 | 3,000 | 6>2=1; 3=5>1 |
| TCuTF36 | ppm | 6,958 | 8,49 | 0,9955 | 0,8858 | 7,167 | 7,333 | 7,000 | 7,000 | 6,917 | 6,333 | |
| TZnTF36 | ppm | 48,500 | 15,56 | 0,4103 | 0,0691 | 49,333 | 46,000 | 50,500 | 47,500 | 49,000 | 48,667 | |
| PSiTF36 | g=plt | 0,342 | 15,61 | 0,9980 | 1,0000 | 0,539 | 0,438 | 0,399 | 0,291 | 0,236 | 0,152 | 1>2=3>4=5>6 |
| PNTF36 | g=plt | 0,451 | 14,93 | 0,9987 | 1,0000 | 0,818 | 0,563 | 0,479 | 0,354 | 0,290 | 0,200 | 1>2>3>4=5>6 |
| PPTF36 | g=plt | 0,029 | 16,60 | 0,9976 | 1,0000 | 0,062 | 0,036 | 0,031 | 0,021 | 0,015 | 0,011 | 1>2=3>4=5=6 |
| PKTF36 | g=plt | 0,541 | 14,82 | 0,9958 | 1,0000 | 0,773 | 0,660 | 0,625 | 0,461 | 0,424 | 0,305 | 1>2=3>4=5>6 |
| PCaTF36 | g=plt | 0,054 | 18,69 | 0,9957 | 1,0000 | 0,088 | 0,065 | 0,057 | 0,046 | 0,039 | 0,026 | 1>2=3=4=5>6 |
| PMgTF36 | g=plt | 0,056 | 22,55 | 0,9965 | 1,0000 | 0,104 | 0,065 | 0,054 | 0,045 | 0,038 | 0,028 | 1>2=3=4=5=6 |
| PNaTF36 | mg=plt | 0,379 | 22,66 | 0,1779 | 1,0000 | 0,621 | 0,501 | 0,397 | 0,319 | 0,272 | 0,166 | 1>2>3=4=5>6 |
| PFeTF36 | mg=plt | 1,373 | 19,32 | 0,9227 | 1,0000 | 2,557 | 1,650 | 1,397 | 1,181 | 0,922 | 0,531 | 1>2=3=4=5>6 |
| PAjTF36 | mg=plt | 0,253 | 45,97 | 0,6438 | 0,9954 | 0,420 | 0,270 | 0,205 | 0,282 | 0,223 | 0,116 | 1>4=2=5=3=6 |
| PMnTF36 | mg=plt | 0,854 | 17,75 | 0,9982 | 1,0000 | 1,971 | 1,135 | 0,898 | 0,569 | 0,382 | 0,171 | 1>2>3>4>5>6 |
| PNiTTF36 | mg=plt | 0,392 | 24,75 | 0,9757 | 1,0000 | 0,106 | 0,495 | 0,547 | 0,408 | 0,411 | 0,388 | 3=2=5=4=6>1 |
| PCrTF36 | mg=plt | 0,003 | 230,93 | 0,9212 | 0,0244 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | |
| PCoTF36 | mg=plt | 0,032 | 22,72 | 0,6735 | 1,0000 | 0,051 | 0,038 | 0,037 | 0,025 | 0,022 | 0,017 | 1>2>3>4=5=6 |

TABLEAU 7.3. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO_4 (2^{ème} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO_4 (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|--------------|---------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (184,1) | D3 (368,2) | D4 (736,4) | D5 (1472,8) | D6 (2945,6) | |
| PCuTF36 | mg/plt | 0,088 | 14,58 | 0,9963 | 1,0000 | 0,168 | 0,115 | 0,091 | 0,067 | 0,054 | 0,035 | 1>2>3>4=5>6 |
| PZnTF36 | mg/plt | 0,622 | 30,36 | 0,9781 | 1,0000 | 1,160 | 0,761 | 0,670 | 0,471 | 0,398 | 0,275 | 1>2=3=4=5=6 |
| TKmTF36 | meq% | 119,582 | 8,99 | 0,9940 | 1,0000 | 84,832 | 108,979 | 123,526 | 123,575 | 135,175 | 141,404 | 6=5=4=3>2>1 |
| TCamTF36 | meq% | 22,110 | 7,86 | 0,9422 | 0,9999 | 18,655 | 20,285 | 21,922 | 23,502 | 23,988 | 24,308 | 6=5>3=2=1; 4>2; 3>1 |
| TMgmTF36 | meq% | 36,547 | 8,05 | 0,6925 | 0,9986 | 36,212 | 32,769 | 33,990 | 37,179 | 38,510 | 40,622 | 6>1=3=2; 5>3; 4>2 |
| TNamTF36 | meq% | 0,139 | 21,56 | 0,9970 | 0,5842 | 0,116 | 0,145 | 0,138 | 0,145 | 0,152 | 0,138 | |
| BasTF36 | meq% | 178,378 | 6,26 | 0,9960 | 1,0000 | 139,815 | 162,178 | 179,576 | 184,401 | 197,825 | 206,472 | 6=5>4=3>2>1 |
| PKmTF36 | meq/plt | 13,843 | 14,82 | 0,9958 | 1,0000 | 19,773 | 16,880 | 15,976 | 11,782 | 10,856 | 7,794 | 1>2=3>4=5>6 |
| PCamTF36 | meq/plt | 2,670 | 18,69 | 0,9957 | 1,0000 | 4,395 | 3,244 | 2,865 | 2,283 | 1,928 | 1,308 | 1>2=3=4=5>6 |
| PMgmTF36 | meq/plt | 4,584 | 22,55 | 0,9965 | 1,0000 | 8,572 | 5,336 | 4,459 | 3,720 | 3,132 | 2,284 | 1>2=3=4=5=6 |
| PNamTF36 | meq/plt | 0,016 | 22,66 | 0,1779 | 1,0000 | 0,027 | 0,022 | 0,017 | 0,014 | 0,012 | 0,007 | 1>2>3=4=5>6 |
| PBasTF36 | meq/plt | 21,114 | 15,02 | 0,9984 | 1,0000 | 32,766 | 25,482 | 23,318 | 17,798 | 15,928 | 11,394 | 1>2>3>4=5>6 |
| K/BasTF36 | % | 66,594 | 4,39 | 0,9381 | 0,9994 | 60,477 | 66,833 | 68,707 | 66,785 | 68,235 | 68,530 | 3=6=5=2=4>1 |
| Ca/BasTF36 | % | 12,476 | 6,70 | 0,9163 | 0,9624 | 13,386 | 12,595 | 12,229 | 12,756 | 12,151 | 11,737 | 1>3=5=6; 4>6 |
| Mg/BasTF36 | % | 20,852 | 11,17 | 0,9187 | 0,9996 | 26,054 | 20,484 | 18,988 | 20,381 | 19,537 | 19,667 | 1>2=4=6=5=3 |
| Na/BasTF36 | % | 0,078 | 19,89 | 0,9899 | 0,7223 | 0,083 | 0,088 | 0,077 | 0,078 | 0,077 | 0,066 | |
| Mg/CaTF36 | - | 1,668 | 8,27 | 0,7503 | 0,9991 | 1,942 | 1,621 | 1,551 | 1,597 | 1,613 | 1,684 | 1>6=2=5=4=3 |
| Mono/BivTF36 | - | 2,042 | 11,83 | 0,9484 | 0,9990 | 1,564 | 2,062 | 2,217 | 2,049 | 2,168 | 2,193 | 3=6=5=2=4>1 |
| Ca/(Ca+Mg)TF | - | 0,377 | 5,20 | 0,7154 | 0,9979 | 0,341 | 0,382 | 0,392 | 0,387 | 0,384 | 0,374 | 3=4=5=2=6>1 |
| N/NiTF36 | - | 2002,863 | 19,73 | 0,4016 | 1,0000 | 7814,916 | 1207,388 | 881,130 | 881,461 | 688,766 | 543,517 | 1>2=4=3=5=6 |
| P/NiTF36 | - | 140,169 | 18,60 | 0,6296 | 1,0000 | 590,833 | 77,178 | 56,223 | 50,652 | 36,459 | 29,667 | 1>2=3=4=5=6 |
| K/NiTF36 | - | 2169,932 | 22,15 | 0,8255 | 1,0000 | 7415,250 | 1453,736 | 1152,757 | 1160,540 | 1113,029 | 824,279 | 1>2=4=3=5=6 |
| Ca/NiTF36 | - | 226,128 | 16,16 | 0,1470 | 1,0000 | 836,917 | 138,268 | 105,066 | 113,257 | 91,257 | 72,001 | 1>2=4=3=5=6 |
| Mg/NiTF36 | - | 249,746 | 28,50 | 0,4021 | 1,0000 | 990,083 | 135,293 | 98,971 | 109,691 | 89,430 | 75,006 | 1>2=4=3=5=6 |
| Na/NiTF36 | - | 1,629 | 35,86 | 0,7781 | 1,0000 | 6,000 | 1,130 | 0,748 | 0,784 | 0,659 | 0,455 | 1>2=4=3=5=6 |
| Fe/NiTF36 | - | 6,174 | 15,18 | 0,8396 | 1,0000 | 24,408 | 3,496 | 2,585 | 2,909 | 2,192 | 1,455 | 1>2=4=3=5=6 |
| Al/NiTF36 | - | 1,102 | 47,18 | 0,9358 | 1,0000 | 4,083 | 0,608 | 0,396 | 0,668 | 0,535 | 0,323 | 1>4=2=5=3=6 |
| Mn/NiTF36 | - | 4,254 | 14,11 | 0,4954 | 1,0000 | 18,767 | 2,351 | 1,639 | 1,389 | 0,908 | 0,469 | 1>2=3=4=5=6 |
| Cr/NiTF36 | - | 0,012 | 323,99 | 0,4489 | 0,2374 | 0,033 | 0,007 | 0,011 | 0,007 | 0,004 | 0,006 | |
| Co/NiTF36 | - | 0,133 | 24,51 | 0,8824 | 1,0000 | 0,483 | 0,085 | 0,068 | 0,062 | 0,052 | 0,045 | 1>2=3=4=5=6 |
| Cu/NiTF36 | - | 0,402 | 16,69 | 0,6232 | 1,0000 | 1,600 | 0,248 | 0,167 | 0,167 | 0,130 | 0,097 | 1>2>3=4=5=6 |
| Zn/NiTF36 | - | 2,766 | 23,93 | 0,7485 | 1,0000 | 10,992 | 1,560 | 1,215 | 1,137 | 0,944 | 0,747 | 1>2=3=4=5=6 |

TABLEAU 7.4. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DOSES CROISSANTES DE NiSO₄ (2^{ème} ESSAI)

| Paramètres | Unités | Moyennes générales | CV (%) | Probabilités des facteurs contrôlés | | Effets de doses croissantes de NiSO ₄ (mg/kg de sol) | | | | | | Comparaisons des traitements |
|-------------------------|--------|--------------------|--------|-------------------------------------|--------|---|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------------------------|
| | | | | Bloc | Dose | D1 (0) | D2 (184,1) | D3 (368,2) | D4 (736,4) | D5 (1472,8) | D6 (2945,6) | |
| ETPc/PP36 | ml/g | 196,617 | 24,99 | 0,4300 | 0,9997 | 124,321 | 160,688 | 179,036 | 195,521 | 244,602 | 275,533 | 6>4=3=2=1 ; 5>3 |
| CondPer36 | µS/cm | 2939,694 | 7,47 | 0,9662 | 1,0000 | 2077,333 | 2615,000 | 2646,667 | 3095,833 | 3246,667 | 3956,667 | 6>5=4>3=2>1 |
| pHPer36 | - | 5,775 | 10,71 | 0,9049 | 1,0000 | 4,658 | 5,133 | 5,158 | 5,892 | 6,867 | 6,942 | 6=5>4=3=2=1 |
| THCO ₃ Per36 | meq/l | 0,134 | 138,88 | 0,9937 | 0,8719 | 0,010 | 0,127 | 0,010 | 0,177 | 0,243 | 0,235 | |
| TCIPer36 | meq/l | 0,247 | 24,89 | 0,7464 | 0,9936 | 0,193 | 0,203 | 0,212 | 0,271 | 0,278 | 0,323 | 6>3=2=1 ; 5=4>1 |
| TSO ₄ Per36 | meq/l | 20,633 | 11,76 | 0,8893 | 1,0000 | 14,379 | 19,078 | 18,974 | 22,085 | 22,533 | 26,747 | 6>5=4>2=3>1 |
| TNO ₃ Per36 | meq/l | 12,587 | 23,09 | 0,3817 | 1,0000 | 7,038 | 10,533 | 10,241 | 13,297 | 14,079 | 20,333 | 6>5=4=2=3=1 |
| TPO ₄ Per36 | mg/l | 19,751 | 34,05 | 0,3963 | 0,6003 | 22,582 | 20,190 | 20,063 | 21,930 | 19,192 | 14,550 | |
| Σ-Per36 | meq/l | 33,600 | 13,29 | 0,7328 | 1,0000 | 21,621 | 29,942 | 29,437 | 35,830 | 37,133 | 47,638 | 6>5=4>2=3>1 |
| TCaPer36 | meq/l | 13,622 | 21,00 | 0,5979 | 1,0000 | 7,780 | 11,807 | 12,658 | 13,737 | 15,397 | 20,358 | 6>5=4=3=2>1 |
| TMgPer36 | meq/l | 16,045 | 20,94 | 0,6915 | 1,0000 | 9,095 | 13,880 | 14,893 | 16,136 | 18,195 | 24,073 | 6>5=4=3=2>1 |
| TKPer36 | meq/l | 0,809 | 38,18 | 0,4068 | 0,2778 | 0,874 | 0,752 | 0,692 | 0,938 | 0,863 | 0,738 | |
| TNaPer36 | meq/l | 0,834 | 14,05 | 0,8917 | 1,0000 | 0,582 | 0,775 | 0,797 | 0,879 | 0,892 | 1,081 | 6>5=4=3=2>1 |
| TNH ₄ Per36 | meq/l | 3,173 | 62,28 | 0,6115 | 0,8621 | 4,108 | 3,573 | 2,409 | 4,506 | 2,867 | 1,575 | |
| Σ+Per36 | meq/l | 34,485 | 13,28 | 0,8023 | 1,0000 | 22,438 | 30,787 | 31,449 | 36,195 | 38,214 | 47,824 | 6>5=4=3=2>1 |
| TFePer36 | mg/l | 0,262 | 117,38 | 0,4206 | 0,4309 | 0,342 | 0,145 | 0,283 | 0,123 | 0,267 | 0,412 | |
| TMnPer36 | mg/l | 0,225 | 150,76 | 0,7745 | 0,7629 | 0,423 | 0,370 | 0,078 | 0,081 | 0,334 | 0,064 | |
| TNiPer36 | mg/l | 22,311 | 81,55 | 0,3576 | 0,9999 | 0,124 | 3,813 | 5,868 | 22,489 | 41,083 | 60,491 | 6>4=3=2=1 ; 5>3 |
| TCrPer36 | mg/l | 0,108 | 258,05 | 0,4488 | 0,4488 | 0,060 | 0,067 | 0,060 | 0,063 | 0,338 | 0,060 | |
| TCoPer36 | mg/l | 0,042 | 11,38 | 0,7999 | 0,8663 | 0,042 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,043 | 0,047 | |
| TSiO ₂ Per36 | mg/l | 33,583 | 16,09 | 0,3891 | 0,4187 | 32,250 | 33,333 | 36,583 | 34,333 | 30,917 | 34,083 | |
| Mg/CaPer36 | - | 1,177 | 3,56 | 0,1449 | 0,0782 | 1,161 | 1,174 | 1,179 | 1,181 | 1,182 | 1,187 | |

ANNEXE 8

CULTURE HYDROPONIQUE DU MAÏS

CULTURE HYDROPONIQUE DU MAÏS

1. Objectifs

L'objectif principal de cette expérimentation est de déterminer précisément le seuil de toxicité du nickel en solution pour le maïs, en cultivant ce dernier sur des solutions contenant des doses croissantes de sulfates de nickel.

L'avantage de ce type d'expérimentation est que le nickel 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 déjà pour mettre en évidence la concentration du nickel en solution à partir de laquelle la toxicité apparaît.

Ses limites tiennent au fait que le maïs ne peut être cultivé facilement au delà du 8ème jour en raison de l'instabilité croissante des plants due à la faiblesse de leur maintien et de l'exigence croissante de leur nutrition.

2. Mise en place de l'expérimentation

500 graines de maïs (hybride double GH 5010) sont mis à germer pendant environ deux jours. 120 sont ensuite sélectionnées par la longueur de leur racine principale de façon homogène. Ainsi, la longueur des racines au départ de l'expérimentation est de 9 mm \pm 2 mm.

Ces plantules prégermées sont coincées verticalement dans des trous adaptés à leur taille fait dans une plaque de polystyrène de 5 mm d'épaisseur, la racine disposée vers le bas, et de façon à permettre au coléoptile de se développer le plus naturellement vers le haut.

10 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. Les 10 solutions contiennent les doses de nickel, sous forme de sulfate, suivantes : 0 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 30 - 40 - 60 - 80 - 100 μ mole/l (soit 0 - 0,147 - 0,294 - 0,587 - 1,174 - 1,761 - 2,348 - 3,523 - 4,697 - 5,871 mg/l).

Le volume des solutions est de 2 litres, ce qui est suffisant pour limiter l'effet de concentration du milieu par évapotranspiration. Chaque solution contient la fumure de base suivante : K_3PO_4 154 μ M, $Ca(NO_3)_2$ 264 μ M, $Mg(NO_3)_2$ 269 μ M, $FeSO_4$ 5,4 μ M, $MnSO_4$ 5,9 μ M, H_3BO_3 8 μ M, $CuSO_4$ 0,8 μ M, $ZnSO_4$ 2,4 μ M, et $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ 0,03 μ M. Le pH des solutions est de 6,4, et il n'est pratiquement pas influencé par les doses croissantes de $NiSO_4$.

Les 10 bassines sont posées sur la paillasse du laboratoire.

3. Résultats

Les longueurs des racines et les hauteurs des coléoptiles ont été mesurées respectivement après 45 heures et 70 heures de culture dans les différentes solutions. La figure 8.1. qui suit nous montre que les valeurs de ces deux mesures diminuent nettement à partir de 30 $\mu\text{Mole/l}$ de Ni.

Le seuil de toxicité du nickel en solution, dans les conditions de l'expérience, est donc compris entre 20 et 30 $\mu\text{Mole/l}$ (entre 1,17 et 1,76 mg/l).

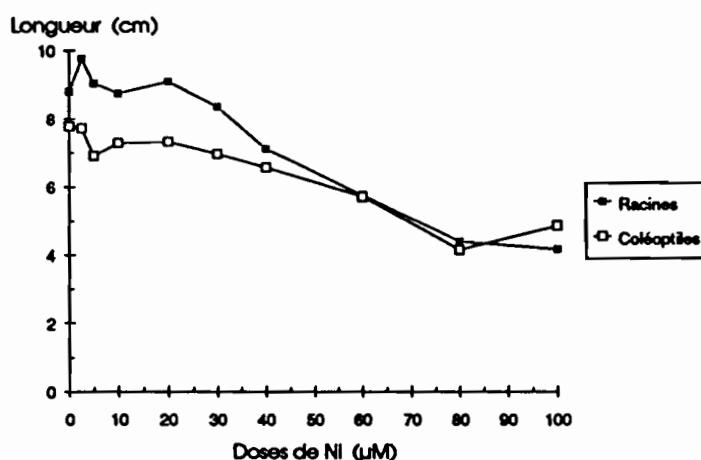


Fig. 8.1. Mesure de la longueur des racines après 45 heures et des coléoptiles après 70 heures de mise en solution des plantules.

