THESE

présentée

A L'UNIVERSITE DE PARIS VII

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT D'ETAT ES-SCIENCES

PAR

Fouad ABO

INFLUENCE DU BORE ET DU MANGANESE SUR LA NUTRITION, LE DEVELOPPEMENT ET LA PRODUCTION DU BLE (Triticum aestivum L.) SUR SOLS DE REGIONS TEMPEREE ET ARIDE.

Soutenue le 22 Novembre 1984 devant la Commission d'examen :

MM.	R. HELLER	Président
	R. CHAUSSAT	
	G. AUBERT	Rapporteurs
	M. PINTA	
	J.B. VIEIRA DA SILVA	
	C. LIORET	Examinateurs

POUR QU'UN ESPOIR SURVIVE :

NOTRE TERRE PRODUIRA MIEUX.

A tous ceux qui sous le soleil brulant et les intempéries de la vie,

n'épargnent pas leurs efforts pour rendre la terre plus fertile.

A MON PERE

A MA MERE

qui, en vivant une vie dûre, ont lutté ardemment

pour nous permettre une vie meilleure.

several years ago a colleague of mine, upon returning from an international congress of soil science, said to me :
"Soil science is dead, there is nothing new coming out"

" I agreed with him and sick ," that is because you have left the plant out of the soil science picture".

C.D. Foy 1983
Iowa state J. RES., 57 (4).

TABLE DES MATIERES

Avant-Propos

Introduction 1

CHAPITRE I - Evolution de nos connaissances sur les oligo-éléments

1 - Esquisse historique 9
1.1 - Le Bore 9
1.1.1 - Le Bore dans les sols 10
1.1.2 - Le Bore dans les plantes 15
1.2 - Le Manganèse 17
1.2.1 - Le Manganèse dans les sols 17
1.2.2 - Le Manganèse dans les plantes 18
1.3 - Autres oligoéléments 21
1.3.1 - Le Zinc 21
1.3.2 - Le Cuivre 22
1.3.3 - Le Fer 23

2 - Influence du développement méthodologique 24

CHAPITRE II - La plante et les sols étudiés

1 - La plante 31
1.1 - Justification du choix 31
1.2 - Description morphologique 32
2 - Les sols 36
2.1 - Justification du choix 36
2.2 - Description de deux milieux 37
2.2.1 - Le cadre géographique 37
2.2.1.1 - La Vallée de l'Euphrate (Nord-Est Syrien) 37
2.2.1.2 - La région de Grignon 41
2.2.2 - Le climat 41
2.2.2.1 - La Vallée de l'Euphrate 41
a - Les températures 41
b - Les précipitations 42

2.2.2.2 - La région de Grignon 42
a - Les températures 42
b - Les précipitations 44
2.2.3 - Le cadre géologique, géomorphologique et hydrologique 44
2.2.3.1 - La région de la Vallée de l'Euphrate 44
2.2.3.2 - La région de Grignon 48
2.3 - Description des profils des sols étudiés 48
2.3.1 - Sol peu évolué sur alluvion argilo-limoneuse 48
2.3.2 - Sol brun lessivé sur limon 49
2.3.3 - Sol de rendzine sur calcaire sablo-graveleux (Lutétien) 50
2.4 - Caractéristiques des sols 50
2.4.1 - Analyse physique 51
2.4.1.1 - Analyse granulométrique 51
2.4.1.2 - Courbe de l'humidité/PF 54
2.4.1.3 - Agrégats et stabilité structurale 55
2.4.2 - Principales caractéristiques chimiques des sols 57
2.4.2.1 - Complexe absorbant 57
2.4.2.2 - Matière organique 58
2.4.2.3 - Données analytiques diverses 58
2.4.2.4 - Analyses se rapportant au degré de salinités des sols 60
2.4.3 - Déterminations des argiles 63
3 - Conclusion 66

CHAPITRE III - Méthode de culture

1 - Description du dispositif expérimental et du cycle de culture 71
1.1 - Plan expérimental 72
1.2 - Permutation et rotation des pots 75
1.3 - Expériences effectuées et description des traitements 75
1.3.1 - Première expérience 75
1.3.2 - Deuxième expérience 76
1.3.3 - Expérience à partir des grains obtenus lors de la première expérience 77

2 - Pots utilisés et préparation 78
3 - Germination et transplantation 78
4 - Arrosage 79
5 - Composition chimique des solutions fertilisantes apportées à la culture 81

CHAPITRE IV - Méthodes et techniques analytiques

1 - Préparation et mise en solution des échantillons 85
1.1 - Echantillons de plantes 85
1.2 - Echantillons de sols 87
1.2.1 - Méthode d'attaque et de mise en solution pour le dosage des oligoéléments totaux 87
1.2.2 - Méthode de mise en solution pour le dosage des oligoéléments extractibles 88
1.2.3 - Méthode d'extraction du bore total 89
1.2.4 - Méthode d'extraction du bore à l'eau bouillante 90
2 - Technique d'analyse et application aux éléments étudiés 91
2.1 - Spectrométrie d'absorption atomique 91
2.1.1 - Généralité et principe 91
2.1.2 - Spectrométrie d'absorption atomique avec flamme et application aux dosages de (Ca, Mg, K, Zn, Mn.) 92
2.1.3 - Spectrométrie d'absorption atomique par voie électrothermique et application au dosage (Cu, Mn) 93
2.1.4 - Problèmes particuliers liés à l'analyse des plantes et des sols 97

2.1.4.1 - Absorption non spécifique 97
2.1.4.2 - Effet de la matrice 99
2.1.4.3 - Sensibilités obtenues 99
2.1.4.4 - Contamination 100
2.1.5 - Recherche du programme thermique pour le dosage de chaque élément 100
2.1.6 - Contrôle de la précision de dosage 105
2.1.7 - Contrôle des résultats 106

2.2 - Spectrométrie d'absorption moléculaire et application au dosage de (B, Fe, P) 108
2.2.1 - Généralité et principe 108
2.2.2 - Dosage du bore, du fer et du phosphore 109
2.3 - La spectrométrie d'émission atomique avec atomisation dans un plasma induit (ICP), application au dosage du bore. 109
2.3.1 - Notions de plasma 109
2.3.2 - Appareillage et recherche informatisées des longueurs d'onde 110
3 - Dosage des oligoéléments totaux et extractibles dans les sols étudiés 111
4 - Dosage de chlorophylle 116

DEUXIEME PARTIE - Résultats et Interprétation

CHAPITRE V - Etude de la cinétique de retention et de mobilité des oligoéléments dans les sols

1 - But et perspective 121
2 - Méthode d'étude et expériences effectuées 122
2.1 - Méthode d'étude 122
2.2 - Expériences effectuées 125
3 - Expérience avec bore et manganèse stable 126
3.1 - L'élution du cuivre 126
3.2 - L'élution du fer 130
3.3 - L'élution du manganèse 131
3.3.1 - Elution du manganèse du sol sur limon 131
3.3.2 - Elution du manganèse du sol de rendzine 136
3.3.3 - Elution du manganèse du sol peu évolué sur alluvion 137
3.4 - L'élution du bore 139
3.4.1 - L'élution du bore du sol sur limon 139
3.4.2 - L'élution du bore du sol de rendzine 140
3.4.3 - L'élution du bore du sol peu évolué sur alluvion 142
4 - Expérience avec ^{54}Mn 143
4.1 - Elution du calcium 143

4.2 - Elution du potassium 148
4.3 - Elution du magnésium 152
4.4 - Elution du bore 155
4.5 - Elution du manganèse stable 157
4.5.1 - Elution du manganèse stable de sol sur limon 157
4.5.2 - Elution du manganèse stable de sol de rendzine 158
4.5.3 - Elution du manganèse stable de sol peu évolué sur alluvion 160
4.6 - Mesures de la radioactivité 160
4.6.1 - Coefficient d'élution de la radioactivité 161
4.6.2 - Radioactivité spécifique (R.A.S) 161
4.7 - Coefficient d'élution de la radioactivité (^{54}Mn) 163
4.8 - Mesure de radioactivité spécifique (R.A.S) 165
5 - Interprétation 169
5.1 - Le cuivre 169
5.2 - Le fer 170
5.3 - Les éléments majeurs (Ca, K, Mg) 171
5.4 - Le bore 173
5.5 - Le manganèse 177
6 - Conclusions 181

CHAPITRE VI - Fertilisation en bore et en manganèse et caractéristiques biologiques des plantes

1 - Croissance 184
1.1 - Croissance générale 184
1.2 - Nombre de feuilles et croissance de limbes 187
1.2.1 - Nombre de feuilles 187
1.2.2 - Croissance des limbes 188
1.2.2.1 - Croissance des limbes des plantes cultivées sur sol brun lessivé sur limon 188
1.2.2.2 - Croissance des limbes des plantes cultivées sur sol rendzine sur calcaire 188
1.3 - Tiges 193
2 - Développement 195
2.1 - Epiaison et floraison 195
2.2 - Nombre d'épillets totaux et stériles 195

3 - Symptomologie 198
3.1 - Symptomologie générale 198
3.2 - Teneur en chlorophylle 204
4 - Interprétation 206
5 - Conclusion 209

CHAPITRE VII - Fertilisation en bore et en manganèse et rendement

1 - Fertilité naturelle spécifique (FNS) des sols et rendement 213
2 - Production de biomasse et fertilisation en oligo-éléments 219
2.1 - Etude statistique informatisée 219
2.1.1 - Création des "fichiers sources" 219
2.1.2 - Création des sous fichiers 219
2.1.3 - Traitements statistiques 220
2.1.3.1 - Fichiers des moyennes 220
2.1.3.2 - Analyse de variance 220
2.1.3.3 - Tests d'égalité de variance 220
2.1.3.4 - Etude de coefficient de corrélation 220
2.1.3.5 - Analyse de régression 220
2.2 - Biomasse et fertilisation en bore 221
2.3 - Biomasse et fertilisation en manganèse 235
2.4 - Biomasse et fertilisation simultanée en bore et en manganèse 238
3 - Production de biomasse, stade de développement et fertilisation en bore et en manganèse 242
4 - Interprétation 246
4.1 - Essai d'interprétation comparative de la fertilité et de production entre sol de région tempérée et sol de région aride 246
4.2 - Fertilisation en bore et rendement 247
4.3 - Fertilisation en manganèse et rendement 249
4.4 - Relation entre bore et manganèse appliqués et rendement 250
5 - Conclusion 252

CHAPITRE VIII - Alimentation oligominérale de plante

1 - Prélèvement, migration et accumulation des éléments nutritifs dans les plantes en fonction des doses appliquées du bore et du manganèse 255
1.1 - Bore 255
1.1.1 - Prélèvement, migration et accumulation du bore dans les racines 255
1.1.2 - Le bore dans les tiges 263
1.1.3 - Le bore dans les gaines 265
1.1.4 - Le bore dans les limbes 269
1.1.5 - Le bore dans les grains 271
1.2 - Manganèse 274
1.2.1 - Prélèvement, migration et accumulation du manganèse dans les racines 275
1.2.2 - Le manganèse dans les tiges 282
1.2.3 - Le manganèse dans les gaines 282
1.2.4 - Le manganèse dans les limbes 285
1.2.5 - Le manganèse dans les grains 285
1.3 - Autres oligoéléments 287
1.3.1 - Le cuivre 287
1.3.2 - Le zinc 295
1.3.3 - Le fer 298
1.4 - Eléments majeurs 302
1.4.1 - Le phosphore 302
1.4.2 - Le potassium 305
1.4.3 - Le calcium 311
1.4.4 - Le magnésium 314
2 - Fixation des oligoéléments apportés aux sols 318
2.1 - Bore 318
2.2 - Manganèse 322
3 - Interprétation 323
3.1 - Prélèvement, migration et accumulation du bore et effet du bore et du manganèse apportés 323
3.2 - Prélèvement, migration et accumulation du manganèse et effet du manganèse et du bore apportés 329
3.3 - Prélèvement, migration et accumulation des autres oligoéléments (Cu, Zn, Fe) et effet du manganèse et du bore apportés 333

3.3.1 - Le cuivre 333
3.3.2 - Le zinc 334
3.3.3 - Le fer 335
3.4 - Prélèvement, migration et accumulation des macro-éléments (P, K, Ca, Mg) et effet du manganèse et du bore apportés 336
3.4.1 - Le phosphore 336
3.4.2 - Le potassium 337
3.4.3 - Le calcium 338
3.4.4 - Le magnésium 339
4 - Conclusion 340

CHAPITRE IX - Influence de la nutrition oligominérale de la plante mère sur certaines propriétés biologiques de la descendance

1 - Faculté germinative des semences 345
2 - Symptologie et biomasse 346
2.1 - Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de bore 346
2.2 - Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de manganèse 346
2.3 - Cas des plantes dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse 350
3 - Prélèvement et accumulation des oligoéléments 350
3.1 - Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de bore 350
3.1.1 - Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse 350
3.1.2 - Prélèvement et accumulation des autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn) 353
3.2 - Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de manganèse 353
3.2.1 - Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse 354
3.2.2 - Les autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn) 356
3.3 - Cas des plantes dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse 358

3.3.1 - Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse 358
3.3.2 - Prélèvement et accumulation des autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn) 358
4 - Interprétation et conclusion 361

Résumé et conclusions générales 365

Liste bibliographique 371

Annexe I - X

AVANT PROPOS

Les années écoulées pour préparer cette thèse étaient enrichissantes, d'abord scientifiquement mais aussi de plusieurs points de vue. Il serait dommage de ne pas faire un arrêt pour en parler; même si on est par coutume,mené à n'aborder que les actions positives.

Ainsi avant de clore ce travail, il m'est agréable de rendre hommage à tous ceux qui ont participé, d'une façon directe ou indirecte, à l'accomplissement de ces recherches.

A Monsieur RUELLAN, Directeur Général de l'Institut Français de Recherches Scientifiques pour le développement en Coopération - ORSTOM - j'adresse mes remerciements pour l'encouragement qu'il m'a prodigué et je souhaite que la coopération continue entre l'ORSTOM et la SYRIE.

C'est avec beaucoup de plaisir et de sincérité que je viens remercier Monsieur René HELLER, Professeur à l'Université de PARIS VII, d'avoir bien voulu consacrer une partie de son temps pour suivre mon travail dès le début en l'enrichissant de son expérience. Le sens critique et la démarche intellectuelle de présentation de Monsieur HELLER m'ont été toujours forts utiles. Je le remercie d'avoir bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse.

A Monsieur Maurice PINTA Directeur de recherche à l'ORSTOM, Je témoigne de ma gratitude pour l'aide qu'il m'a apporté dans la conduite de mes recherches et les moyens qu'il a mis à ma disposition. C'est dans son laboratoire, spécialisé et réputé dans les recherches sur les éléments traces que ce travail a été réalisé. Malgré ses occupations, il a suivi ce travail et a consacré une partie de son temps pour la correction de ce manuscrit en particulier la partie méthodologique. Je le remercie également d'avoir accepter d'être rapporteur de ce travail. A Monsieur Georges AUBERT Inspecteur général de recherche et Professeur de pédologie, je rends hommage à ses qualités scientifiques en tant qu'un des

piliers de la pédologie française. Depuis le choix des sols au début de travail, en passant par le suivie des recherches jusqu'à la correction du manuscrit,cette thèse a pu profiter de son expérience et j'en suis reconnaissant. Sa grande connaissance des sols à travers le monde, son courage et la continuité de son travail constituent un exemple encourageant pour moi. Je lui sais gré d'avoir bien voulu accepter d'être rapporteur de cette thèse.

C'est à Monsieur René CHAUSSAT Professeur à l'Institut National Agronomique de PARIS-GRIGNON, que j'adresse ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il a manifesté envers mon travail dès la préparation du plan des recherches. Les conseils et les remarques qu'il m'a prodigués ont été de grande utilité, les discussions que nous avons eu notamment pendant la correction de plusieurs chapitres ont été enrichissantes. Sa qualité d'enseignant et son goût perfectionniste ont été un réel apport à ce travail, malgré les petites différences scientifiques de points de vue. Je lui exprime également ma gratitude de bien vouloir accepter d'être un rapporteur de ce mémoire.

C'est un plaisir pour moi de pouvoir compter dans ce jury Monsieur VEIERA DA SILVA Professeur à l'Université de PARIS VII, il a bien voulu donner son avis sur mon travail et je tiens à adresser à Monsieur DA SILVA ma gratitude.

J'exprime mes remerciements et ma gratitude à Monsieur Claude LIORET Professeur à l'Université de PARIS SUD (ORSAY), qu'il a bien voulu accepter de faire partie de ce jury.

Il m'est agréable de dire à Monsieur Michel SERVANT Directeur de l'ORSTOM-BONDY, toute ma gratitude. Il a su être toujours disponible pour m'aider à résoudre des problèmes pratiques et j'en suis reconnaissant.

C'est à l'Ami et au Scientifique compétent Jean Claude FARDEAU Responsable de groupe sol et fertilisants (service radioagronomie de centre d'étude nucléaire de CADARACHE), que j'exprime toute ma gratitude pour l'accueil amical qu'il m'a réservé pour réaliser l'expérience avec le ^{54}Mn isotope radioactif. Je souhaite la prolongation de notre fructueuse collaboration. A son équipe j'adresse également mes remerciements.

Je remercie aussi Monsieur VALLERIE Responsable de l'antenne ORSTOM à Cadarache.

Ma gratitude va également à Monsieur DABIN Inspecteur de recherche en pédologie à l'ORSTOM, qu'il m'a toujours bien accueilli pour discuter de mon travail.

Je réserve des remerciements chaleureux à Monsieur DEJARDIN biométricien et chef de service de biométrie, pour les conseils très utiles qu'il m'a donné pour l'élaboration des plans des expériences et des études statistiques ultérieures.

Il m'est agréable de remercier également Messieurs PELLOUX pour les analyses chimiques des sols et pour ses explications, COMBEAU Chef de service de physique du sol de Bondy pour les analyses que j'ai effectuées dans son laboratoire.

Je parlerai ensuite de mes compagnons de travail quotidien :

C'est avec grand plaisir que je viens témoigner mes remerciements à mon ami Marc PANSU pour sa collaboration fructueuse. Son aide m'a été très utile pour l'étude statistique et informatique dans ce travail. Les heures, parfois tardives, que nous avons passé ensemble dans le laboratoire et sur son temps libre, ne sont guère oubliables.

Que Monsieur RIANDEY trouve ici ma reconnaissance pour son aide technique dans les méthodes physico-chimiques et les problèmes analytiques.

Que Madame VILLETTE trouve ici ma sincère reconnaissance pour toutes les analyses qu'elle a réalisées avec beaucoup de soin.

A Roger GAVINELLI j'assure toute ma reconnaissance et mon amitié pour son humanité et pour n'avoir jamais épargné son aide.

Je remercie vivement Madame RICHARD qui m'a initié aux méthodes d'analyses.

Je tiens à remercier Dominique RAMBAUD, Madame MILLOT et Monsieur KOUKOUI pour la détermination minéralogique des sols.

J'assure de ma reconnaissance Madame ALPHONSE pour les dosages qu'elle a effectués quand j'étais débordé de travail.

A Jocelyne YAZI, à Yvonne LAFITTE et à Isabelle ROCHETTE, j'exprime mon amitié et mes remerciements pour les services qu'elles m'ont rendu toujours avec le sourire.

Les discussions que nous avons eu ont été réciproquement enrichissantes. Les bons souvenirs que je garde d'elles resteront des longues années vivants dans mon esprit.

Le travail soigneux de Madame AMIOT, pour le lavage de la verrerie, facteur important dans le dosage des oligoéléments, mérite toute ma reconnaissance. Je la remercie pour son sourire continu malgré le travail important que je lui portant fréquemment.

Je tiens à remercier Sylvie DOULBEAU de l'antenne ORSTOM de C.E.N. de Cadarache pour le courage et la tenacité qu'elle a montré pour m'aider dans la réalisation de mon travail.

Je profite encore de cette occasion pour remercier Messieurs BILLARD, PELLETIER, CHAUDRON du service des Serres qui n'ont jamais épargné leurs efforts pour m'apporter une aide matérielle efficace.

A tout le personnel de la bibliothèque du Centre ORSTOM de Bondy. Mesdames : MASSONI, HARDY, MILLET et Mesdemoiselles : PERROT, PELEGRIN, ALDEBERT, SINEGRE, j'adresse mes remerciements très sincères.

A Martine CREQUIGNE, j'exprime ma reconnaissance pour avoir assurer une partie de la frappe de cette thèse.

Que ceux que j'ai oublié d'ajouter à cette liste me pardonnent et soient assurés de ma profonde reconnaissance pour tous les gestes humains et amicaux qui ont contribué à rendre agréable mon séjour en FRANCE.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les études sur la fertilité des sols du point de vue des oligo éléments n'ont fait que tardivement leur entrée dans l'histoire de la recherche. La disproportion, entre les connaissances sur les oligo éléments et celles sur les éléments majeurs, pouvait être justifiée il y a une vingtaine d'années, par suite de l'absence des méthodes analytiques rapides, sensibles, fidèles et sélectives. Un tel état ne peut plus être expliqué aujourd'hui, où nous disposons de méthodes modernes et accessibles (absorption atomique, activation neutronique, spectrométrie d'émission atomique avec atomisation dans un plasma...).

On constate que de plus en plus de chercheurs s'intéressent aux oligo éléments. En effet, plusieurs questions se posent encore sur la présence de ces éléments dans les sols et les plantes, en particulier sur leur absorption, leur rétention et leur fonction biologique.

A la suite d'une première étude (ABO, 1980), il nous est apparu important d'explorer et d'approfondir ce domaine sur trois types de sols différents du point de vue de leur pédogénèse, de leur composition, du climat et de la végétation et provenant de deux régions tout à fait différentes (SYRIE, FRANCE). Cette étude est d'autant plus intéressante qu'elle nous permettra de déceler le comportement de ces éléments dans des sols aussi différents ; de plus très rares sont les recherches qui ont été consacrées à ce sujet sur ces types de sols. Aujourd'hui la logique des choses veut qu'on entreprenne des recherches pour étendre nos connaissances sur des matériels peu ou pas connus ; nous avons voulu

que ce travail soit une réflexion concrète sur des problèmes concernant des matériaux nouveaux pratiquement pas étudiés de ce point de vue (oligo éléments). Cette réflexion qui tient compte des moyens à disposition est axée sur deux oligo éléments (B et Mn) et permettra de cerner certains problèmes sur deux éléments de base qui constituent avec le matériel choisi, un choix intrinsèque.

Pourquoi le bore et le manganèse ? Ce sont deux oligo éléments qui posent des problèmes dans certaines régions de la Syrie. Ces deux éléments ne se comportent pas de la même manière ni en leur absorption par les plantes, ni en leur présence, fixation et migration dans les sols ; ils n'ont pas non plus le même rôle nutritif ou physiologique dans les plantes. Leurs effets sur les autres éléments ne sont pas eux non plus toujours semblables. Toutes ces différences sont intéressantes à étudier.

On sait que la nutrition des plantes est l'un des facteurs les plus importants qui contrôlent la production de biomasse, au sens le plus large du mot. Plus récemment, on a constaté que l'efficacité de l'utilisation de certains éléments nutritifs est hautement liée à la spécificité génétique des plantes.

Une attention particulière doit être prêtée pour augmenter l'efficacité d'une part de la fertilité naturelle du sol et des fertilisants minéraux d'autre part. Augmenter l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs sous certaines conditions écologiques des écosystèmes passe aussi par le rôle spécifique des éléments minéraux dans les plantes. Les recherches très à la mode des génotypes futurs devraient être accompagnées par l'étude de l'influence de ces génotypes et leur spécificité génétique sur l'assimilabilité des oligo éléments, ainsi que par le choix des méthodes pour la sélection des génotypes spécifiques correspondant à des types spécifiques des sols et des éléments minéraux (EPSTEIN et STOUT, 1951 ; GERLOFF, 1963 ; KLIMASEVSKI, 1974 ; SARIC, 1983)

La spécificité génétique variable des éléments nutritifs, a été abordée il y a déjà une soixantaine d'années, elle intéresse de nouveau les chercheurs, ces dernières années (EPSTEIN et al., 1980 ; FOY et al., 1978 ; VOSE, 1982...). Le progrès des méthodes d'expérimentation et la nécessité croissante de limiter l'utilisation des engrais pour éviter la pollution de l'écosystème, ainsi que la crise d'énergie

et ses conséquences sur l'augmentation des prix d'engrais très utilisés et souvent importés par les pays du tiers monde, ont incité les chercheurs à étudier ce problème. Ceci rend aisément compréhensible l'intérêt manifesté de nouveau à la recherche de la spécificité des éléments nutritifs pour rationaliser, autant que possible, la dépense en engrais et pour mieux équilibrer la dépense et le rendement. Nous signalons que ce petit paragraphe n'est pas greffé ici par désir économique de l'auteur mais il est, à nos yeux, au coeur de toute étude complète de la fertilisation et de la nutrition des plantes.

Il est à signaler que la teneur et la concentration des éléments nutritifs dans les tissus végétaux et leur prélèvement dans les sols sont des critères importants pour établir la spécificité génétique des éléments nutritifs. La spécificité des éléments minéraux pour les cultivars se manifeste par la différence de prélèvement des ions, leur transport, leur distribution et leur accumulation dans les organes. Cette différence se manifeste aussi dans leur réutilisation, leur efflux et leur rôle dans le processus du métabolisme.

Une des raisons principales qui nous a poussé à nous intéresser à la spécificité des éléments tels que le bore et le manganèse est étroitement liée à la question suivante : Comment peut-on faire progresser l'efficacité de l'utilisation de la fertilité naturelle des sols aussi bien que les engrais par les cultures ? Nous avons voulu travailler sur des types de sols tout à fait différents pour montrer la différence de productivité et le rôle spécifique des éléments dans chaque type de sol en utilisant la même plante ; ceci constitue un aspect important de ce travail quand on sait que 21 % des sols dans le monde sont naturellement fertiles, 40,8 % sont trop acides et 38,2 % sont pauvres en éléments nutritifs et difficiles à drainer, surtout dans les pays du tiers monde, où l'on rencontre souvent ce dernier type (SARIC, 1983). Cette pauvreté liée à l'augmentation du coût des engrais et susceptible de continuer, nous laisse craindre à une réduction de la production alimentaire.

De là résulte l'importance qu'il faut attacher à l'étude de la meilleure utilisation des fertilisants en fonction de la fertilité naturelle des sols ; de même il convient de contrôler l'équilibre minéral dans les sols en fonction de l'accumulation éventuelle d'un élément pouvant avoir des conséquences néfastes sur l'assimilabilité des autres éléments.

Nous pouvons penser que la composition des tissus végétaux n'est pas toujours significative de la disponibilité des oligo éléments dans le sol (il peut être riche mais les conditions climatiques ne sont pas convenables). Une concentration dans les tissus peut résulter d'un taux satisfaisant des éléments assimilables dans le sol, mais aussi dans certains cas d'une croissance anormale pour de diverses raisons.

Un taux inadéquat dans les feuilles peut être dû à la carence dans le sol mais peut aussi être dû à d'autres raisons : excès d'éléments, excès de sels... Partant donc de ce principe, nous pensons qu'une étude basée uniquement sur les données de la composition des feuilles, peut conduire à des erreurs sérieuses. Continuer à fertiliser sur cette base peut conduire, dans le sol, à une accumulation néfaste surtout des oligo éléments moins absorbés par la plante. C'est la combinaison de ces analyses avec des tests simultanés du milieu (une approche déjà abordée, ABO , 1980) qui peut éliminer beaucoup de ces objections ; les tests du sol comprenant la mesure du pH, des sels solubles des éléments majeurs et oligo éléments, de quelques données physiques (stabilité structurale, analyse granulométrique..) et d'une étude minéralogique . Dans ce travail nous avons voulu, en cernant cette idée directrice, approfondir nos connaissances sur les problèmes de toxicité et de carence en bore et en manganèse.

Nous avons donc voulu approfondir la conception de l'étude de la fertilité dans différents types de sols tout en tenant compte aussi de la capacité de croissance du limbe des plantes et voir s'il y a une relation entre la fertilisation et cette croissance.

Nous essayerons d'étudier, ensuite, l'effet de l'intoxication des grains par le bore et le manganèse sur leur descendance. Cet effet, jusqu'à maintenant pratiquement pas étudié est abordé dans ce travail sous plusieurs aspects (morphologie, biomasse, composition

minérale).

Nous sommes en droit de penser que le comportement pédochimique des oligo éléments n'est pas le même dans un sol cultivé et dans un sol nu. La présence des végétaux dans le sol fait intervenir des paramètres spécifiques tels que l'effet des racines qui influence la rétention et la migration des oligo éléments ; il y a là un facteur biologique dont il faut tenir compte et qui rend l'étude du milieu très complexe. D'ailleurs ce problème n'a pas reçu jusqu'à nos jours de solution définitive, et suscite des controverses et des polémiques entre chercheurs surtout agronomes, écologistes, pédologues et minéralogistes. En séparant les deux cas (sols nus, sols avec végétation) et en faisant appel aux méthodes classiques et radioactives, nous avons essayé dans le cinquième chapitre d'étudier la rétention et la cinétique des oligo-éléments (B, Mn) par le sol, phénomène peu étudié (EVANS et SPARKS, 1983). Nous avons étudié en même temps l'effet d'apport du bore et du manganèse en dose croissante sur la rétention de quelques éléments majeurs et autres oligo éléments ; nous nous sommes efforcés d'approfondir nos connaissances, sur ce problème majeur dans la fertilité du sol, à partir des données obtenues dans les deux cas (sols nus, sols avec végétation). Le traitement informatique des résultats nous servira, outre l'intérêt habituel de la statistique, à mieux cerner l'interprétation de nos résultats.

Enfin, nous avons tenté de dégager des voies de recherche pour l'avenir, car bien des points n'ont pas pû être réalisés pour de multiples raisons dans le cadre de ce travail.

CHAPITRE 1

EVOLUTION DE NOS CONNAISSANCES SUR LES OLIGO ELEMENTS

I - 1 ESQUISSE HISTORIQUE

Loin d'avoir la prétention de cerner l'ensemble des connaissances sur ce sujet, nous avons jugé nécessaire de donner un aperçu relativement succinct des travaux touchant le domaine de notre étude.

Nous donnons ici cette esquisse pour les oligo éléments selon l'importance qu'ils occupent dans cette recherche.

I-1.1. Le bore

Le bore est le troisième membre du troisième groupe du tableau périodique ; c'est un non métal avec un nombre atomique de cinq et une valence constante de 3^+.

Bien que l'usage commercial du borax est connu depuis le Moyen Age, l'importance du bore en agronomie ne fut connue qu'après la découverte du bore dans les cendres des plantes par WITTSTEIN et APOIGER en 1857. Bien plus tard, G. BERTRAND en 1905 recommande l'utilisation du bore comme engrais et en 1912 il signale que des traces de bore sont essentielles pour la croissance des plantes. WARINGTON en 1923, dans son travail sur la fève, semble le premier à fournir des preuves irréfutables sur la nécessité du bore. La preuve de l'indispensabilité du bore pour les plantes en général est accréditée par SOMMER et LIPMAN en 1926. Les essais aux champs de BRANDENBURG (1931)

démontrent que la maladie du coeur de la betterave à sucre et de la mangue est due à la carence en bore, ce qui incita à la recherche sur le bore ; peu de temps après le borax devint un fertilisant de plusieurs récoltes.

1.1.1. Le bore dans les sols.

La plupart des auteurs s'accordent sur la teneur de bore total dans les sols ; cette teneur varie entre 2 et 100 ppm (SWAINE, 1955 ; SILLANPAA, 1972 ; KRAUSKOPF, 1972 ; EVANS et SPARKS, 1983...), d'autres auteurs cités par AUBERT et PINTA , 1979 donnent les moyennes de 1-2 à 250-270 ppm pour les sols tourbeux eutrophes de la Palestine. Les roches les moins riches sont les roches éruptives et les teneurs les plus élevées se trouvent dans les sols formés sur schistes, loess, alluvions et toutes textures sédimentaires fines. Le bore est un élément lithophile (il se trouve principalement dans les minéraux silicatés), il existe souvent sous forme d'oxyanion à cause de sa petite taille (rayon ionique = 0,23 Å ; EVANS et SPARKS, 1983). Dans les solutions aqueuses, il se trouve sous forme d'acide borique, un acide monobasique faible qui joue comme un accepteur d'électron (PARFITT, 1978). Le bore réside principalement dans les minéraux argileux ; les argiles d'origine marine sont plus riches en bore que les argiles des vallées inondées par les rivières ou des lacs. Cette différence est utilisée comme critère pour reconnaître l'origine de l'argile, bien que les chercheurs ne soient pas tous d'accord sur ce critère.

Les minéraux du bore ne sont pas formés uniquement par une précipitation d'origine géologique, ils sont facilement altérés par le changement de température après la déposition ; le Kernite est un exemple qui illustre ce phénomène. Un autre minéral plus connu, le borax est formé par un échauffement faible des sédiments initiaux (SMITH, 1960).

Le bore comme les autres oligo éléments existe sous forme de "pools" chimiques qui sont les suivants :

- Ions solubles à l'eau,
- Ions échangeables,
- Ions complexes, chelatés ou adsorbés,
- Oxydes métalliques, minéraux argileux secondaires,
- Minéraux primaires.

Le bore du sol peut être réparti en trois fractions : totale, soluble à l'acide et soluble à l'eau. La teneur en bore total est peu importante pour le diagnostic agronomique de l'état de disponibilité du bore ; le plus souvent moins de 5 % de bore total est disponible pour les plantes.

Le bore soluble à l'eau peut donner des indications générales sur le bore disponible. Certains auteurs dont FLEMING, (1980) y attachent trop d'importance en considérant que le bore soluble à l'eau sert de guide pour la capacité nutritionnelle du sol en bore et classent les sols en trois catégories :

1) - à moins de 1 ppm le bore est insuffisant pour une croissance normale des plantes,
2) - de 1 à 5 ppm le bore est suffisant pour une croissance normale des plantes,
3) - à plus de 5 ppm le bore peut avoir des effets toxiques.

Dans le sol, la disponibilité du bore est dépendante de la texture, du pH, de l'humidité du sol, et de la matière organique. KUBOTA et al. en 1948 ont trouvé que le bore est plus mobile dans les horizons de surface des sols sableux et que cette mobilité baisse dans les horizons profonds où le pourcentage d'argile devient plus important et réduit le mouvement d'eau.

Le bore est moins soluble dans les milieux à pH élevés, il est donc important de surveiller le pH en cas de chaulage des sols acides; par contre le bore disponible dans ces sols reste facile à lessiver et des problèmes de carence peuvent avoir lieu dans les sols très alcalins. La fixation du bore en cas de surchaulage vient plutôt des sels alcalins issus du chaulage, que du Ca apporté. BERGER et TRUOG, (1945) ont montré que l'augmentation du pH au dessus de 7,0 est nécessaire si on veut réduire le bore disponible ; de pH 4,7 à 6,7 le bore disponible augmente dans les sols cultivés. Les sols des régions arides et semi-arides sont riches en bore total. La toxicité du bore se manifeste pour plusieurs végétaux quand le taux du bore est entre 0,5 et 5 ppm ; Celui-ci se révèle présent dans beaucoup de sols irrigués de ces régions (EVANS et SPARKS, 1983), et surtout dans les régions très sèches (MAYNARD, 1979).

Les principales formes reconnues de bore dans les sols sont :

- Bore présent dans les structures des silicates,
- Bore associé aux minéraux argileux et aux sesquioxydes (bore adsorbé),
- Bore dans la matière organique.

De nombreuses études ont été faites (BIGGAR et MILTON, 1960, HINGSTON, 1964, COUCH et GRIM, 1968, KEREN et MEZUMAN, 1981), pour déterminer le mécanisme de la sorption du bore dans les argiles et les sols. Toutefois, en considérant le sol comme un système complexe et hétérogène, plusieurs travaux ont été faits pour étudier le bore dans les argiles pures, les oxydes Al et Fe et les composés organiques afin d'expliquer la présence et le rôle du bore dans les sols. Cette explication est loin d'être achevée aujourd'hui ; des études suggèrent plusieurs mécanismes d'action du bore, parmi eux :

1) - la sorption des ions boratés,
2) - la sorption de molécules d'acide borique,
3) - la formation des complexes organiques,
4) - la précipitation de borate insoluble avec l'Al et le Si,
5) - l'entrée du bore dans la structure des argiles.

De nombreuses conclusions apparaissent sur l'adsorption du bore. La plus plausible est probablement l'accroissement de l'adsorption du bore avec le pH. L'illite est le plus actif dans les pH faiblement basiques (HINGSTON, 1964 ; KEREN et MEZUMAN, 1981), avec augmentation de l'adsorption aux pH 5 à 8,5. Cette augmentation est due à l'adsorption des ions boratés ou au changement de surface des argiles qui favorisent la création de sites d'adsorption. La sorption du bore dans la montmorillonite augmente largement entre pH 7,0 à 9,5 (HINGSTON, 1964).

L'acide borique domine dans des pH inférieurs à 7,0. Les borates prédominent dans des pH plus élevés. L'effet du climat et des conditions du sol sur les oligo éléments en général et le bore en particulier, reste assez mal connu.

PETERSON et NEWMAN (1976) ont étudié l'effet du pH sur la disponibilité du bore pour les plantes. Jusqu'au pH 6,4 l'absorption de bore par les plantes ne montre pas de différence mais à pH 7,4 l'absorption diminue de 2,5 fois. L'absorption n'est pas en relation avec le bore soluble à l'eau jusqu'à pH 6,4. Le bore soluble à l'eau est en relation avec la matière organique, quand cette dernière augmente, les valeurs du "critère" de bore soluble à l'eau deviennent plus élevées. Dans un sol tourbeux, PRASAD et BYRNE (1975) notent qu'avec plus de 10 ppm de bore soluble à l'eau, la toxicité n'apparaît pas, même dans les plantes semi tolérantes comme le maïs.

La fertilisation en bore se fait soit par application au sol (méthode la plus utilisée), soit par application foliaire surtout pratiquée comme un moyen rapide et efficace pour corriger des carences se manifestant en cours de croissance des plantes. Le bore est ajouté soit sous forme de fertilisant de bore uniquement, soit sous forme d'engrais composés de multiples éléments nutritifs.

Une liste conventionnelle des fertilisants de bore est donnée dans le tableau 1. Tous ces fertilisants sont utilisés en application au sol mais l'acide borique et les borates sont plus souvent employés en application foliaire par pulvérisation. La quantité optimale de bore à apporter varie selon l'espèce des plantes, la pratique culturale, l'humidité, la matière organique, le chaulage et le pH.

TABLEAU 1

LISTE DES FERTILISANTS DE BORE GENERALEMENT UTILISES

(FLEMING, 1980)

Fertilisants	Composition	Bore en %
Borate 46	$Na_2B_4O_7.5H_2O$	15,2
Borate 65	$Na_2B_4O_7$	20,0
Borax	$Na_2B_4O_7.10H_2O$	11,3
Acide Borique	H_2Bo_3	17,5
Solubor	$Na_2B_8O_{13}.4H_2O$	20,5
Portabor	$Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$	16,0
Frit bore FTE 11		11,0
" " " 115		11,0
" " " 171	Complexes	2,0
" " " 181	borosilicatés	2,0
" " " 176E	(granulés)	2,0
" " " 176F		6,3
" " " 501		6,0

La toxicité du bore concerne en particulier les régions sèches où une teneur élevée de bore existe naturellement dans les sols. Mais la teneur de bore dans l'eau d'irrigation significativement plus importante joue, à moyen et à long terme, un rôle décisif sur l'intoxication des plantes dans ces régions arides et semi-arides. Dans les régions tempérées le problème de toxicité apparaît dans les sols légers supportant des cultures sensibles au bore. Ce problème dépend en général de la mauvaise utilisation des engrais (FLEMING, 1980).

1.1.2. Le bore dans les plantes.

En général les monocotylédones contiennent moins de bore que les dicotylédones; certaines espèces de *papilionacées* et *crucifères* sont spécialement riches en bore. La déficience en bore apparaît sur une large variété des plantes quand le taux de bore descend au dessous de 15 µg/gde matière sèche ; le taux adéquat se range entre 20 et 100 µg/gde bore. La toxicité se manifeste au dessus de 200 µg/gde bore.

La teneur de bore dans les plantes varie avec l'espèce et l'âge, GORSLINE et al., (1968) observent que les différents hybrides de Maïs montrent une variabilité génétique concernant l'absorption de bore et sa concentration dans les feuilles.

La connaissance des besoins des plantes est une condition préalable indispensable pour une fertilisation efficace et rationnelle, malgré que toute classification à cet égard soit arbitraire, mais, en règle générale, le taux de 1,2 à 3,2 KgB/ha est retenu pour la culture des légumes et les plantes racines "root crops" tandis que 0,6 à 1,2 KgB/ha suffit pour les autres cultures (céréales et oléagineux surtout) (MURPHY et WALSH, 1972) ; d'autres auteurs divisent ces cultures en deux groupes : plantes avec des grands besoins en bore et plantes avec des besoins 6 à 8 fois moindre (FINK, 1982). FLEMING, (1980) divise les plantes en trois groupes selon leurs besoins mais signale qu'une telle classification est obligatoirement arbitraire: celles à grand besoin en bore, celles à besoin moyen, enfin celles à faible besoin. Les besoins en bore sont influencés par le calcium et le potassium disponible dans les sols. Depuis 1944 JONES et SCARSETH ont trouvé que le besoin en bore est relié au rapport Ca/B dans les tissus des plantes, ce rapport est de 100 : 1 pour la betterave à sucre. Le mouvement du bore de la solution du sol vers les racines, est étudié par WILKINSON (1972) ; l'absorption s'oppérant aussi sous forme d'acide borique non dissocié. La capacité d'absorption des racines reste un facteur majeur qui limite l'absorption des éléments nutritifs (BYRON, 1982).

La fonction de bore dans la plante reste un des problèmes en nutrition minérale (TANADA, 1983). Les différentes réponses proposées sont examinées par DUGGER (1973) et SHKOL'NIK (1974). Récemment, plusieurs auteurs suggèrent que le bore est nécessaire pour régulariser la fonction de certaines membranes cellulaires des plantes

supérieures (POLLARD et al., 1977 ; TANADA, 1978 ; HIRSCH et TORREY, 1980 ; SMYTH et al., 1980 ; LONERGAN, 1983). Ces auteurs concluent sur l'observation de l'effet remarqué de bore dans le potentiel bio-électrique à travers la membrane. D'autres fonctions du bore sont établies depuis plusieurs décennies; ainsi en 1937 LOHNIS a signalé que la carence en bore retarde le développement de pollen de plusieurs espèces de plantes. En 1981 AGARWALA et al., ont étudié l'effet de carence sur le changement morphologique et enzymatique pendant le développement de pollen de maïs. L'activité et l'intégrité de la membrane extérieure du cytoplasme (le *plasmalema*) des cellules des racines sont altérées sous l'effet de carence en bore de telle façon que l'absorption de P, K et Rb est diminuée ; cet effet a lieu sans aucun symptôme visible. L'attention est actuellement focalisée autour de l'activité enzymatique associée au *plasmalema*.

Le bore aurait un rôle dans le contrôle du niveau du phénol dans les cellules et peut prédire le dommage causé par l'accumulation de phénol (ADAMS, 1964).

Le bore serait associé à l'activité méristèmatique, à celle de l'auxine (COKE et al., 1968) à la formation de la pectine des membranes cellulaires, à la synthèse des acides nucléïques (ALBERT, 1965, CORY et al., 1966), au mécanisme d'intervention de l'eau à l'intérieur de la plante. La carence en bore diminue la résistance à certaines infections telle que la maladie du coeur de la betterave, nécrose provoquée par un champignon (le *phoma-betae*) qui envahit le collet lorsque la plante est carencée. Le bore est étroitement lié au maintien de la croissance âpicale et, directement associé à la division cellulaire. De ce fait, certains auteurs, considérent le bore comme l'oligo élément le plus important en agriculture (SILLANPAA, 1972). Le transport de bore à l'intérieur du xylème dès la racine jusqu'au sommet âpical de la plante suscite une controverse ; dans une solution aqueuse simple, le bore se trouve probablement sous forme de molécules d'acide borique, mais l'importance du rôle du complexe sucre-borate dans le transport de sucre est souvent discutée. Les informations manquent sur la stabilité de ce complexe surtout au pH relativement faible du xylème des plantes (FOLETT et al., 1981).

1.2. Le manganèse.

Le manganèse, élément du premier groupe de transition du tableau périodique est un métal de nombre atomique de 25 et trois valences (2^+, 3^+, et 4^+). C'est un élément lithophile, bien que son comportement chimique et sa présence géologique soient similaires au fer mais le manganèse est de nature électropositive plus importante.

1.2.1. Le manganèse dans les sols.

La teneur moyenne de manganèse de l'écorce terrestre est de 1000 ppm manganèse (GOLDSCHMIDT, 1954 ; VINOGRADOV, 1959). La plupart des sols ont, en moyenne, de 500 à 1000 ppm de manganèse extrait par des acides concentrés (manganèse dit total). Pour KRAUSKOPF (1972) les teneurs des sols varient de 20 à 600 ppm ; ces teneurs ne doivent pas être retenues comme une indication pour le manganèse utilisable par les plantes.

L'origine du manganèse dans les sols et dans les plantes vient principalement de la décomposition des roches ferromagnésiennes. La distribution de cet élément est largement contrôlée par la structure et les conditions d'oxydation et de réduction sous lesquelles le composé de manganèse est formé (KNEZEK et al., 1980) ; les formes bivalentes et trivalentes de manganèse sont les formes principales de cet élément dans le sol. Les composés de Mn^{2+} sont les plus solubles. TSYPANOVA (1980) montre que la mobilité du manganèse, sa migration et son accumulation varient en fonction de la variation climatique saisonnière.

En milieu réducteur, ce sont les composés de Mn^{2+} qui restent stables tandis que sous des conditions d'oxydation forte, ce sont les composés de Mn^{4+} (MnO_2...) qui restent stables. Les formes Mn^{2+}, Mn^{3+} et Mn^{4+} pourraient se trouver ensemble sous les conditions de réduction intermédiaire. Contrairement à l'adsorption des autres ions à la surface des oxydes de Mn, l'information sur l'adsorption de manganèse lui-même à la surface disponible du sol est fragmentaire. L'abondance de manganèse dans les roches carbonatées plutôt que dans les schistes, suppose que son adsorption sur des sites communs dans les sols et les sédiments est moins forte que celle des autres métaux lourds (KRAUSKOPF, 1972). Comme pour la plupart des cations le Mn^{2+} est plus fortement adsorbé à des pH élevés. La mobilité du manganèse pour les plantes est réduite lorsqu'il est ajouté sous forme d'engrais composés, méthode qui simplifie le travail d'agriculteur.

TABLEAU 2

FERTILISANTS DE MANGANESE (MURPHY et WALSH, 1972)

Nom du Fertilisant	Composition	Manganèse (Mn %)
Fertilisants non - organiques		
Sulfate de manganèse	$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	24
Oxyde manganeux	MnO	68 - 70
Carbonate de manganèse	$MnCO_3$	31
Chlorure de manganèse	$MnCl_2$	17
Granulé de manganèse	-	10 - 25
Fertilisants organiques		
Chelate de manganèse	MnEDTA	12
Polyflavonoïd	MnPF	8

Ce sont les cultures maraîchères qui, généralement, nécessitent le moins de manganèse (10-12 kg Mn/ha), tandis que la betterave à sucre et l'oignon en ont le plus besoin (respectivement 22-90 kg Mn/ha et 50-80 kg Mn/ha); les légumineuses et les graminées ont des besoins importants:17-67 kg Mn/ha pour le haricot vert, le maïs et l'avoine (FOLLET et al., 1981).

1.2.2. Le manganèse dans les plantes.

L'effet toxique du manganèse sur les céréales a été rapporté par ASO (1902) et signalé plus tard pour diverses cultures. Ainsi MILILKAN (1947) a décrit la nécrose typique du lin dûe à cette carence.

Par contre, la carence naturelle en manganèse dans les

sols fut signalée plus tardivement . Elle se manifeste surtout en présence d'un taux élevé de matière organique du sol ; le manganèse peut être soit adsorbé sur la matière organique, soit compléxé sous forme organo-métallique.

Le transport du manganèse dans la solution pose un problème en milieu oxydant, car c'est sous la forme réduite que la plupart des composés de Mn^{2+} y compris les sulfures sont solubles dans les solutions d'acide faible et en particulier celles du sol ; dans une solution hydrothermale ou en milieu réducteur près de la surface du sol le mouvement de manganèse ne devrait pas être entravé. Dans une solution alcaline le mouvement de manganèse est gêné à cause de l'insolubilité des carbonates et de l'augmentation de son adsorption avec le pH, mais aux pH rencontrés dans la nature le manganèse reste mobile en grande partie. D'une façon générale, les complexes peuvent aider le transport des métaux lourds, mais les complexes de manganèse sont moins stables (HEM, 1963).

RUSSEL (1961) assure que la plante peut absorber le manganèse divalent mais non l'élément tétravalent et que l'absorption de Mn^{3+} est inconnue ; le problème est donc de maintenir un taux raisonnable de manganèse divalent dans le sol.

Le manganèse dans les sols peut poser des problèmes de toxicité ou de carence ; la toxicité se manifeste généralement dans les sols trop acides ou dans les sols engorgés d'eau. Cette toxicité ne se rencontre pas au dessus de pH 6,5, à moins que le sol ne contienne des quantités importantes de manganèse. Les recherches sur la toxicité du manganèse dans les sols acides sont abondantes, par contre celles concernant les symptômes de toxicité dûe à une sur-fertilisation en manganèse manquent.

La déficience de manganèse est souvent observée dans les sols organiques et les sols calcaires ; elle apparaît dans les sols bien draînés à réaction neutre ou calcaire (KNEZEK et al., 1980). Nous donnons dans le tableau n° 2 les fertilisants de manganèse les plus utilisés pour corriger la déficience. Les sulfates de manganèse sont les plus utilisés, ils sont très solubles et peuvent être apportés en application au sol ou par pulvérisation foliaire . Les chelates de manganèse sont utilisés avec succès en application foliaire; en application au sol, ils sont moins efficaces surtout dans les sols riches en matière

organique (RUMPEL et al., 1967 ; WILCOX et CANTLIFF 1969). Les oxydes de manganèse, récemment utilisés sont peu solubles. Les granulés contenant du carbonate de manganèse et de l'oxyde manganeux sont moins souvent utilisés. Le manganèse peut être apporté dans les sols tourbeux. Parmi les graminées (plantes sensibles) c'est l'avoine qui apparaît la plus sensible à la déficience en manganèse. Les plantes sensibles à la carence le sont également à la toxicité de manganèse. Les symptômes de la malformation des végétaux causée par la déficience en manganèse varient d'une plante à l'autre : taches grises allongées sur les feuilles, perte de turgescence, forme affaissée caractéristique chez l'avoine (TROCME, 1973), tache des marais chez les petits pois , tacheture jaune chez la betterave à sucre, maladie jaune chez l'épinard...

Les symptômes de carence apparaissent généralement à partir des teneurs inférieures à 20 ppm de matière sèche, les concentrations dans les plantes varient de 20 à 200 ppm (FOLLETT et al., 1981).

GORSLINE et al., 1965 ont montré que la concentration du manganèse dans le maïs baisse avec le développement de la plante ; par contre elle reste constante chez le haricot dès le premier stade jusqu'à la maturité (JONES et MEDERSKI, 1964). OHKI (1981) donna comme teneur critique de carence de haricot 11 ppm. Les teneurs dans les tissus des plantes sont fonction de plusieurs facteurs: l'âge de la plante, le génotype, le taux de manganèse dans le sol, le taux des autres éléments dans le sol autour des racines, la température du sol, le pH, la matière organique, la capacité d'échange cationique des racines.

Le rôle du manganèse dans la plante est multiple ; c'est un composant des enzymes (arginase, phosphotransférase), il se substitue au magnésium de plusieurs enzymes qui interviennent dans l'ATP (métabolisme du sucre), il participe au système de dégagement d'oxygène en photosynthèse, l'importance de son rôle dans la réaction de HILL est prouvée mais n'est pas définie. Le manganèse a apparemment un rôle dans le photosystème II de la photosynthèse. En définitive, des recherches approfondies sont encore nécessaires pour esquisser le rôle de cet élément dans la plante. L'absorption de manganèse est gouvernée à la fois par voie passive et active ; l'absorption initiale est liée à sa concentration dans le milieu ; cette absorption est soutenue à plus long terme par celle active ; cette dernière est indépendante de la concentration dans le milieu. La température et le manque d'oxygène peuvent inhiber

l'absorption de manganèse (FOLLETT, 1981). Le fait d'avoir une concentration de manganèse, dans la tige des plantes cinq fois plus grande que celle du milieu implique très probablement une intervention métabolique dans son absorption.

Le transport de manganèse à travers la sève apparaît possible car l'application foliaire du manganèse corrige ou diminue sérieusement les symptômes de déficience en manganèse.

1.3. Autres oligo éléments.

1.3.1. Le Zinc.

Le taux moyen du zinc dans la lithosphère est de 80 ppm, tandis que sa teneur moyenne dans les sols varie entre 10 et 300 ppm. Le zinc est plus adsorbé sur la montmorillonite que sur les autres argiles (KNEZEK et al., 1980). SHUMAN (1976, 1977) a montré que la présence des hydroxydes de fer et d'aluminium influence l'adsorption du zinc sur les argiles. En général, son adsorption est directement liée à la capacité d'échange cationique (C.E.C.) des argiles HODGSON (1963) ; malgré tout, le mécanisme de cette adsorption n'est pas encore parfaitement connu. Le zinc forme des complexes avec la matière organique, les acides fulviques et humiques seraient très importants dans l'adsorption du zinc. Le zinc est plus mobile dans les sols acides que dans les sols alcalins. La nécessité du zinc pour les plantes supérieures a été montrée par MAZA (1914). Les concentrations normales dans les végétaux sont entre 25 et 150 ppm. La carence en zinc apparaît à partir des teneurs inférieures à 20 ppm, cette carence est plus prononcée sous climat froid et humide que sous climat sec et chaud (SILLANPAA, 1972).

La carence en zinc provoque des troubles en détruisant l'auxine (facteur de croissance), ce qui expliquerait l'insuffisance de l'allongement des entre-noeuds dans ce cas. L'anhydrase carbonique était récemment encore considéré comme le seul authentique métallo-enzyme dans l'organisme vivant ; c'est à VALLEE et WACKER (1970) que nous devons notre connaissance sur le rôle du zinc, comme un composant essentiel de plusieurs variétés de déshydrogénases, protéinases et peptidases. Plusieurs auteurs s'accordent sur l'effet de la carence du zinc dans la baisse sévère de l'acide ribonucléique (ARN) de ribosome dans les cellules (SCHNEIDER et PRICE 1962 ; WACKER, 1962). SHROTRI et al., (1979) ont montré que la déficience en zinc peut causer une baisse du taux de

chlorophylle "a" et "b" ainsi que des teneurs en sucre et par conséquent en amidon dans le maïs.

1.3.2. Le cuivre.

La teneur moyenne en cuivre de l'écorce terrestre est de 70 ppm, elle est de 2 à 100 ppm dans les sols mais occasionellement cette teneur peut atteindre 5000 ppm ou plus dans des sols riches en cuivre localisés près de minerai de fer (MITCHELL, 1944). Ces teneurs dépendent, comme pour les autres oligo éléments, des teneurs de la roche mère. Le cuivre soluble dépend de plusieurs facteurs : matière organique, pH, variation saisonnière, oxydation et réduction et interaction avec les autres éléments. Il se trouve dans les sols souvent sous forme d'ion Cu^{2+} adsorbé par les argiles ou la matière organique.

La présence du cuivre dans les plantes est signalée depuis plus d'un siècle, il a été reconnu indispensable à la croissance végétale par LIPMAN et MACKINNEY (1931). Sa teneur dans les plantes est inférieure aux autres oligo éléments (5 à 20 ppm). GORS LINE et al., (1965) ont constaté que sa teneur dans le maïs reste stable pendant tout le cycle de la plante.

Plusieurs fonctions du cuivre dans les plantes sont connues : constituant de divers enzymes d'oxydation : laccase, acide ascorbique oxydase, tyrosinase, cytochrome oxydase. Comme le fer, il peut activer la nitrate réductase et catalyser certaines décarboxylations (HELLER, 1977).

La déficience en cuivre se manifeste sur les plantes par des symptômes caractéristiques qui varient selon les plantes. Pour les céréales, ces symptômes sont caractérisés par la perte de couleur des jeunes feuilles, suivies par une cassure des feuilles et éventuellement par la mort de leurs extrémités.

De nombreux chercheurs ont montré que l'influence du cuivre affecte la production plus que le stade végétatif (BROWN et al. 1972 ; GRAVES et STUCLIFF 1974; GRAHAM, 1976). D'autre part, la sensibilité à la carence est très variable d'une plante à l'autre, WOODHOUSE (1964) a indique que l'avoine et le blé sont apparemment de bons indicateurs pour détecter la déficience en cuivre, tandis que le tabac est mois sensible.

L'absorption du cuivre est un phénomène actif, BOWEN

(1969) a constaté que son absorption par les feuilles de canne à sucre est un processus actif, il a constaté aussi que le cuivre est en compétition avec le zinc dans les mêmes sites d'absorption. L'aluminium diminue beaucoup l'absorption de cuivre par les racines de blé, mais apparemment cet effet n'est pas dû à une compétition entre les deux métaux. SPENCER (1966) a montré qu'une forte concentration de cuivre dans le sol diminue la teneur en fer dans les feuilles de citronnier.

1.3.3. Le fer.

Vu l'importance de la teneur en fer de l'écorce terrestre, cet élément peut être considéré comme un élément majeur, il est classé troisième élément en abondance dans les éléments minéraux de l'écorce terrestre après le silice et l'aluminium (environ 5 %). Dans les plantes le fer joue le rôle d'un oligo élément, dans les sols le fer est caractérisé comme un oligo élément à cause de sa faible solubilité et de sa faible assimilabilité par les plantes. Le fait que le fer existe comme un élément natif sous forme ferreuse (Fe^{2+}) et ferrique (Fe^{3+}) fait de lui et de ses composés des indicateurs sensibles sur l'état d'oxydation dans l'environnement naturel. Dans les sols en condition d'oxydation il existe sous forme d'oxydes ferriques stables qui souvent sont plus abondants dans les horizons de surface. La solubilité de ces oxydes augmente dans les pH faibles.

Bien qu'il ait été prescrit déjà au temps des grecs et des romains comme élément thérapeutique, son importance dans la nutrition des plantes ne fut indiquée qu'en 1843 par CRIS. La déficience de fer était la première à être reconnue parmi les oligo éléments. Cette déficience est plus fréquente dans les sols calcaires (RYAN et al., 1967) que dans les autres. Les teneurs des plantes varient beaucoup, entre 50 et 250 ppm, les jeunes plantes sont plus riches (300 à 400 ppm) COX et KAMPRATH (1972). Des symptômes de carence peuvent apparaître sur les plantes qui contiennent moins de 20 ppm. La toxicité n'a pas été signalée dans les conditions naturelles.

Depuis certains temps déjà on sait que le fer peut être chelaté par des composés organiques dans le sol par des réactions avec des groupes carboxyliques, phénoliques, alcooliques, aminés et aldéhydes, avec pour conséquence une réduction de la solubilité de cet élément à l'eau. Ce phénomène est de grand intérêt pour la nutrition des

plantes c'est pourquoi le fer est souvent apporté sous forme de chélates. Ces chélates, sur un plan général sont des composés organiques, qui contiennent les ions métalliques, avec des liens chimiques de force variable, dans la molécule organique ; la solubilité de ces ions dans l'eau est ainsi diminuée et ils ne sont libérés que progressivement. La stabilité relative des chélates de fer dans les sols est de grand intérêt dans la fertilisation en fer de ceux-ci surtout pour les cultures sensibles à la carence en fer. Pour cette carence, les méthodes de diagnostic pédologique ou agronomique basées sur le phénomène de dilution isotopique ont montré un intérêt indiscutable (HETIER et FARDEAU, 1977). Les agents chélatants sont nombreux (EDTA, DTPA, EDDHA...) le pH du sol est important dans le choix de l'un ou l'autre de ceux-ci. Le premier rôle du fer qui a été reconnu dans la plante, c'est sa nécessité absolue pour la maintenance de la chlorophylle dans la plante. Des recherches plus récentes ont établi un rôle plus spécifique du fer dans le métabolisme de l'ARN de chloroplaste. Il est un constituant essentiel des cystochromes et d'autres enzymes du système respiratoire (cytochrome oxydase, catalase, péroxydase). Le fer joue la décarboxylation de certains acides cétoniques (HELLER, 1977).

L'absorption du fer par les racines et son transport dans le xylème ont été récemment de nouveau revus en utilisant des techniques nouvelles qui distinguent le fer qui intervient dans ce processus du fer sur les racines et qui est précipité extracellulairement à l'extrémité de celles-ci, tandis qu'aux premiers centimètres des racines (1 à 4 cm) son absorption et son transport sont plus importants (CLARKSON et SANDERSON, 1978). D'autres auteurs notent que les racines de dicotylédone augmentent leur capacité réductrice en cas de carence en fer (ROMHELD et MARSCHNER 1979). EPSTEIN et STOUT (1951) ont suggéré que le manganèse interfère dans le transport du fer des racines vers les bourgeons. Son absorption augmente avec l'augmentation du manganèse dans la suspension argileuse (OLSEN, 1972).

I - 2 INFLUENCE DU DEVELOPPEMENT METHODOLOGIQUE.

L'état de nos connaissances sur les oligo éléments et les éléments traces en général est étroitement lié au progrès des méthodes physico-chimiques d'analyses. La recherche des oligo éléments dans un

milieu donné exige la mise en oeuvre des techniques sensibles et précises, les techniques classiques ne permettent pas toujours à elles seules de résoudre tous les problèmes que le dosage de certains oligo éléments pose . Nous devons donc faire appel aux méthodes physico-chimiques souvent plus sensibles que les procédés gravimétriques ou volumétriques. En 1919 HILLEBRAND utilisa le mot "trace" pour identifier des constituants présents en quantité en dessous de la limite des analyses quantitatives de l'époque (100 ppm).

Des éléments, autrefois considérés comme contaminants sans fonction définie, sont aujourd'hui reconnus pour avoir un rôle essentiel. Certains autres éléments sont connus maintenant comme toxiques à des teneurs faibles qu'on ne pouvait pas détecter auparavant.

L'essor des techniques physico-chimiques est à la base de développement de nos connaissances à travers les recherches qui ont progressé considérablement surtout dans les sols et les roches avec GOLDSCHMIDT en 1935 et plus tard dans tous les domaines : Pédologie, Agronomie, Biologie...

PINTA, (1962) dégage à partir des données recueillies dans la littérature, des tableaux et des figures des concentrations des éléments traces dans les végétaux, les animaux et l'écorce terrestre ; il émet néammoins des remarques sur l'insuffisance des résultats concernant la composition de l'écorce terrestre. Si certains éléments ne sont pas notés dans ces figures, PINTA signale qu'on ne doit pas conclure à leur absence systématique du milieu ; l'insuffisance de sensibilité des techniques analytiques peut être cause d'omissions. D'autre part le progrès des méthodes analytiques peut mettre en cause les valeurs de ces listes.

Sur le chemin du progrès technique, les spécialistes se sont efforcés d'améliorer aussi la rapidité, la simplicité et la fiabilité des méthodes ; ces améliorations sont des nécessités techniques indispensables pour l'évolution de nos connaissances. Dans ce contexte la simplicité se réfère à la fois aux instruments et à l'équipement auxiliaire utilisé ainsi que la facilité de manipulation et de calculs des résultats ; la fiabilité est liée au degré d'exactitude nécessaire pour l'interprétation, la précision et la validité des méthodes analytiques sous des conditions expérimentales variables (EVENHUIS, 1978).

Ces dernières années, le développement instrumental et l'automatisation des méthodes d'analyse sont introduits dans la détermination des oligo éléments ; ceci a réduit l'intervention de l'opérateur et a augmenté considérablement la fiabilité des résultats. Nous notons ici que la mise en service de ce progrès matériel nécessite un personnel expérimenté.

Le développement instrumental doit aller de pair avec un ensemble de services annexes. En fait, cette importance qui semble convaincre, en théorie, les milieux scientifiques n'est pas toujours appliquée dans la pratique.

Il est utile de signaler le rôle essentiel de l'analyste car c'est sur les données fournies par lui que les interprétations sont fondées, malheureusement bien souvent le rôle de l'analyste n'est pas mis en évidence comme il le mérite. Il est considéré comme une personne appelée à fournir des résultats aux paillasses de laboratoire. Pourtant il serait souhaitable que l'analyste participe et soit associé à la responsabilité de la recherche ; il pourrait ainsi renouveler ses connaissances pour modifier les techniques analytiques et adapter les méthodes de dosage à chaque cas spécifique. Même si pour certaines analyses l'ultime "boîte noire" est déjà achevée pour des matrices bien déterminées, néammoins des progrès significatifs dans la procédure d'analyse surgissent dont l'analyste devrait avoir la possibilité d'assumer et d'entamer et ceci sur l'ensemble de la méthodologie analytique.

Pour que l'analyse des plantes ou des sols soit une méthode de diagnostic efficace, il faut standardiser une série de conditions nécessaires pour la préparation, la mise en solution des échantillons et le dosage ; ceci permet d'obtenir des valeurs de référence aidant à l'interprétation efficace et plus juste des résultats. Pour établir des méthodes de référence plusieurs auteurs et organismes se sont penchés sur la question (C.I.I., 1972 ; PINTA et C.I.I., 1975 ; A.O.A.C., 1980). Pour certains oligo éléments comme le bore, le progrès analytique concrétisé par l'apparition de spectrométrie d'émission atomique avec atomisation dans un plasma induit (ICP) a ouvert de nouveaux horizons dont notre travail a profité pour l'étude du bore dans le sol où il est difficile à doser par toutes autres méthodes.

Le progrès technique va plutôt actuellement vers des méthodes de large application et possédant la sensibilité, la précision,

l'exactitude, la rapidité requise.

La spectrométrie d'émission et d'absorption, la colorimétrie, la polarographie, la spectrométrie d'absorption atomique à effet Zeeman, l'activation neutronique, offrent aujourd'hui d'excellentes méthodes qui se complètent parfois, pour l'analyse de milieux complexes et permettent l'évolution continuelle de nos connaissances sur les oligo éléments.

p. 116

DEUXIEME PARTIE

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

II - 1 LA PLANTE.

1.1. Justification du choix.

Le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) espèce hexaploïde (2 n = 42), à grains nus a été utilisé comme matériel biologique au cours de nos recherches. Ce choix se justifie en raison de l'importance économique et sociale de cette plante alimentaire de première nécessité, tant au Moyen Orient où elle est cultivée depuis plus de 7000 ans (BOYELDIEU, 1980) que le reste du monde. Cette plante occupe en plus une place très importante dans la production nationale syrienne et dans la vie de la population locale. Elle n'a d'ailleurs pas cessé de jouer un rôle important dans la mésopotamie, pays de sa naissance, où elle était considérée comme un "symbole de vie" chez les anciennes populations de cette région.

Par ailleurs la biologie de cette céréale est bien connue. Il s'agit d'une espèce monocarpique et autogame dont le cycle est court et dont les variétés inscrites au catalogue présentent un maximum d'homogénéité génétique.

La phénologie du développement du blé a fait l'objet de nombreuses discussions (ROBINS, 1946 ; BAROCCIO et al., 1976 ; BALIGAR et al., 1979 ; MASLE-MEYNARD, 1980...) et les exigences climatiques des différentes variétés sont bien connues (MALVOISIN, 1981) ; nous avons

CHAPITRE II

LA PLANTE ET LES SOLS ETUDIES

choisi la variété Florence aurore, variété de printemps qui n'a donc pas besoin de vernalisation. Elle est précoce c'est à dire peu sensible aux variations de la durée du jour ; Elle produit généralement un nombre de feuilles réduit et peu variable.

Enfin le blé comme les autres céréales a été utilisé pour l'étude de carence en oligoéléments(HEWITT,1963 ; KING et ALSTON, 1975). C'est une plante connue comme étant un bon témoin pour exprimer les besoins nutritifs des végétaux. BROWN et CLARK, (1977) l'ont utilisée pour étudier l'influence du cuivre sur la maturation. Elle est considérée comme un exemple représentatif de la sensibilité des céréales aux déficiences en cuivre (ROBIN et PEARCE1979), et à la toxicité en cuivre (ABO, 1980).

CARTWRIGHT et al., (1983) en s'appuyant sur ce que RICHARDS (1954) a signalé (le blé est une plante semi-tolérante pour le bore, et peut être choisie comme indicatrice du bore disponible dans le sol) ont utilisé le blé pour étudier la distribution du bore dans les sols de la région semi-aride du Sud de l'Australie où des symptômes de toxicité de bore sont apparus.

1.2. Description morphologique

Le cycle du développement du blé correspond à une succession précise d'"états de développement" depuis la germination du caryopse jusqu'à la maturation des grains.

Ce parcours se traduit par des modifications morphologiques de la plante résultant à la fois des processus de croissance et de développement. Nous donnons ici quelques précisions sur ces modifications morphologiques pour mieux comprendre la terminologie utilisée et la démarche suivie dans ce travail.

La croissance, phénomène quantitatif (augmentation de hauteur, poids...) peut être relativement facile à mesurer et à suivre. En revanche, les changements d'états de développement du pied qui correspondent à une différenciation des méristèmes sont difficiles à mettre en évidence. Un certain nombre d'auteurs ont donc cherché des repères de l'état de développement de la plante, qu'ils ont appelés "stades" de développement ; nous avons choisi l'échelle de FEEKES,(tab3) reprise par

la FAO, qui repose sur la description de la morphologie du brin-maître.

TABLEAU 3 - STADES DE DEVELOPPEMENT DE L'ECHELLE DE FEEKES.

(MASLE-MEYNARD, 1980)

Stade	Description	Stade	Description
1	Levée	9	Début du gonflement (ligule de la dernière feuille visible)
1,1	1 Feuille		
		10	Fin du gonflement (l'épi fend la gaine)
1,2	2 Feuilles		
1,3	3 Feuilles	10.1	Début de l'épiaison
2	Début du tallage	10.5	Epi totalement sorti de la gaine
3	Plein tallage	10.5.1	Début de la floraison
4	Fin du tallage	10.5.4	Floraison complète
5	Début de l'élongation de la tige	11	Formation des grains
6	1 noeud	11.1.	Stade laiteux (les grains ont leur taille maxi.)
7	2 noeuds	11.2.	Stade laiteux-pateux (grain enrichi en amidon, glumes jaunissants)
8	Apparition de la dernière feuille	11.3.	Stade pateux (noeuds jaunissants, feuilles desséchées)
		11.4.	Grains cassants. Plante sèche.

(Une feuille est considérée comme sortie lorsqu'elle atteint 3 cm). Les prélèvements sont réalisés aux stades 2 (début de tallage), 10.5.1. (début de la floraison) et 11.4 (plante sèche).

Ces stades sont aisément repérables visuellement, sans dissection de la plante.

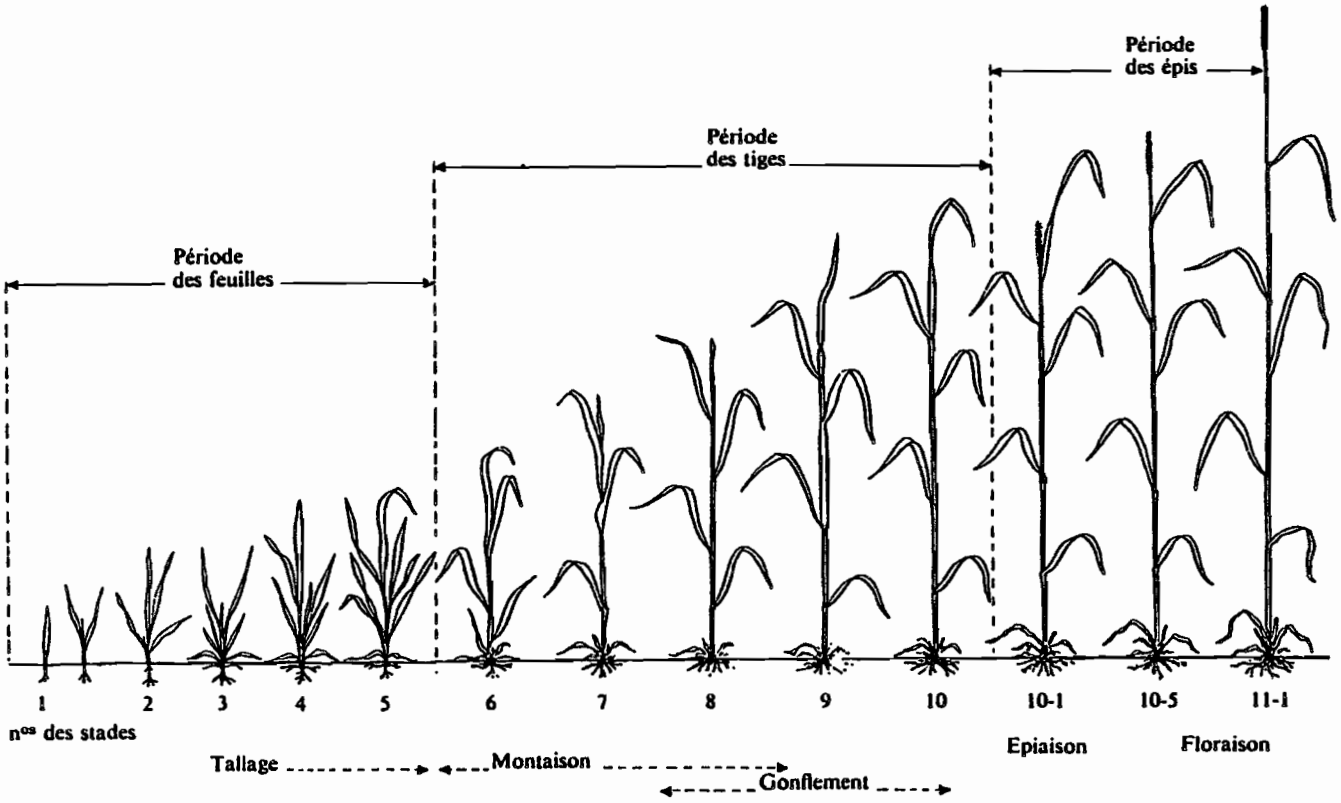


Fig. 1 - Stades repères de la croissance et du développement chez le blé
(BOYELDIEU, 1980)

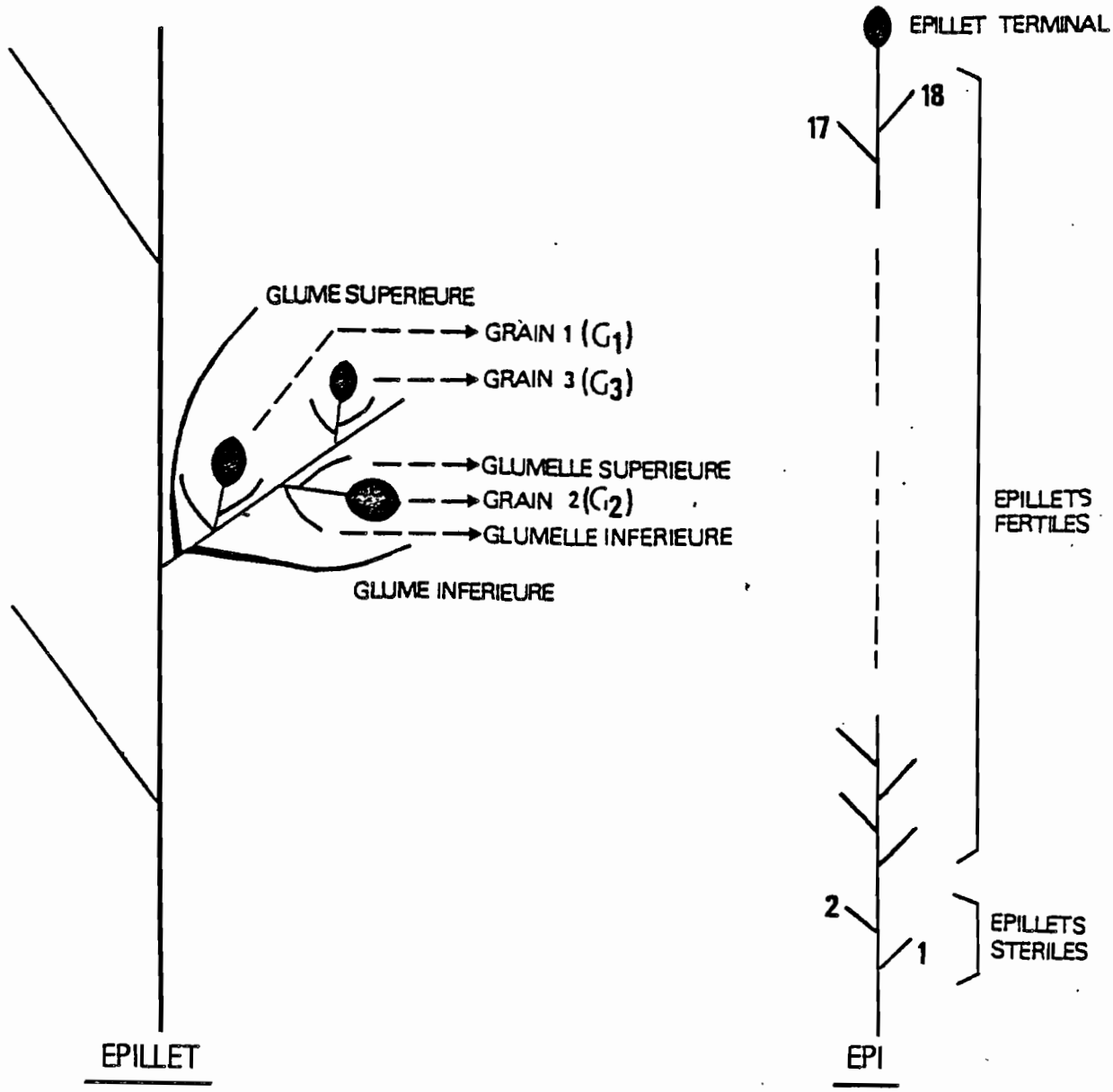


Fig. 2 - Schémas d'un épi et d'un épillet de blé à 3 grains (G1=grain de la base ; G2=grain du milieu G3=grain du sommet)(RACHIDIAN, KAFASHIAN, 1979)

Par ailleurs, sur la figure 2 sont représentées les descriptions morphologiques d'un épi et d'un épillet de blé.

La longueur des limbes des différentes feuilles du pied du blé a été mesurée à la fin de leur croissance, nous avons considéré que la feuille a atteint sa croissance finale lorsque deux mesures successives donnent les mêmes résultats (environ une semaine après leur apparition.

II - 2 LES SOLS.

II.2.1. Justification du choix.

Nous avons travaillé sur les horizons A de trois types de sols différents ; leur choix étant guidé par la volonté d'étudier le comportement des oligo éléments selon le type du sol, la réaction des plantes vis-à-vis des oligo éléments présents naturellement et de ceux apportés.

Nous avons aussi cherché à déterminer pour chaque type de sol, sa capacité naturelle à fournir aux cultures les oligo éléments nécessaires, les normes de fertilisation en bore et en manganèse qui peuvent leur être appliquées, les différents seuils de toxicité.

Ces types de sols résultent de la pédogénèse et de conditions géoclimatiques et biologiques tout à fait différentes (FRANCE, SYRIE). Il nous est apparu important d'essayer de faire une étude comparative sur ces sols qui n'ont pratiquement pas été étudiés sur le plan des oligo éléments.

La connaissance théorique que nous possédons du problème du bore dans les sols à pH élevé, dans des régions arides et semi-arides ainsi que les résultats d'analyse d'eau et de sols de cette région et l'importance sur le plan agricole du type de sol considéré nous ont amené à choisir un sol peu évolué sur alluvions argilo-limoneuse de l'Holocène ancien de la Basse Vallée de l'Euphrate, vallée de première importance pour la Syrie (170.000 hectares sur 18,5 millions d'hectares de surface totale du pays ; FAO, 1972).

Les deux autres sols, l'un brun lessivé sur limon, l'autre rendzine sur calcaire sablo-graveleux du Lutétien ont été prélevés dans une région de climat tempéré plus humide que la vallée de l'Euphrate (Parc de l'Institut National Agronomique (I.N.A.) de Paris-Grignon) ; ce sont des sols assez fréquents dans ces régions et assez différents dans leur structure, texture et composition chimique et minéralogique.

L'étude des oligo éléments dans ces sols reflétera leur comportement en fonction du type de sol et de ses caractéristiques. Nous souhaitons pouvoir combler ainsi, au moins partiellement une lacune dans notre connaissance de l'évolution de ces éléments dans les sols.

II.2.2. Description des deux milieux.

2.2.1. Le cadre géographique

2.2.1.1. La vallée de l'Euphrate (Nord-Est Syrien)

La vallée de l'Euphrate, située dans la partie Nord-Est de la SYRIE (voir fig. 3 et 4), présente une importance capitale dans l'agriculture syrienne, plus particulièrement depuis la construction de l'important barrage de l'Euphrate, cette rivière de 675 km de longueur en territoire syrien sur 2760 km de longueur totale et avec ses affluents (KHABOUR 460 km, BALIKH 105 km et EL SAJOUR 48 km) fournissent à la Syrie 30,10 millions de m3 sur 36,30 millions de m3 d'eau que l'ensemble des rivières fournissent au pays (FAO, 1972). Les eaux de cette rivière ont rendu cette vallée verte et riche depuis les civilisations les plus anciennes (Sumérienne, Babylonienne et Assyrienne). Actuellement ces sols perdent progressivement leur fertilité du fait de la négligeance et de l'ignorance de l'homme ; la dégradation de la végétation et de tout le milieu influe sur la détérioration du climat.

Les échantillons ont été prélevés sur le périmètre de la Basse Vallée de l'Euphrate située dans la partie nord-est de la Syrie (figure 3 et 4). Le lieu précis de prélèvement se situe à proximité de la ville de Deir El-Zor sur l'Euphrate ; il s'agit du champ d'expérimentation (de BANI-TAGLEB, figure 4) de l'ACSAD (The Arab Center for the Studies of Arid zones and Dry Lands).

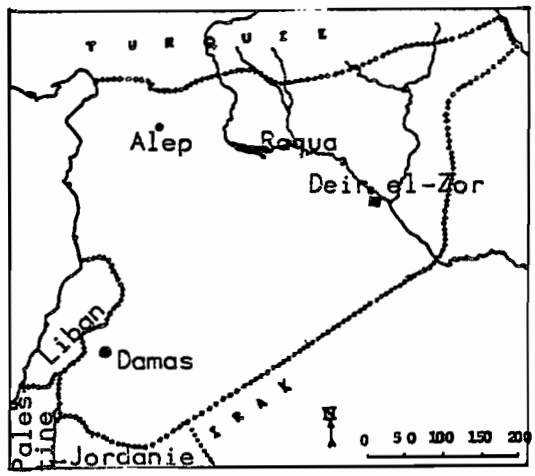


Figure 3 - Carte de la Syrie

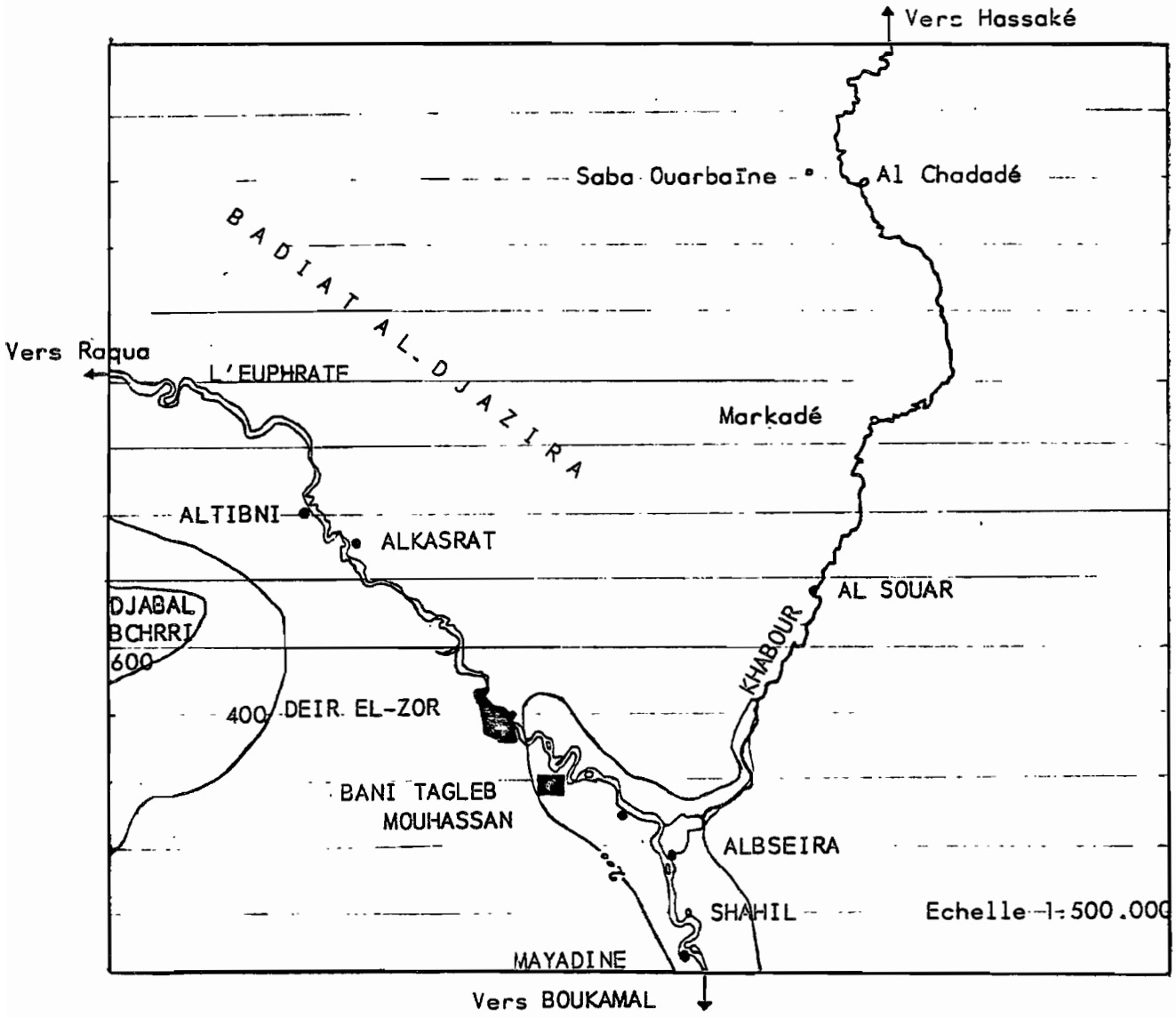


Fig. 4 - Carte détaillée de la région de prélèvement.

■ Lieu de prélèvement

Climat Franc-Saharien

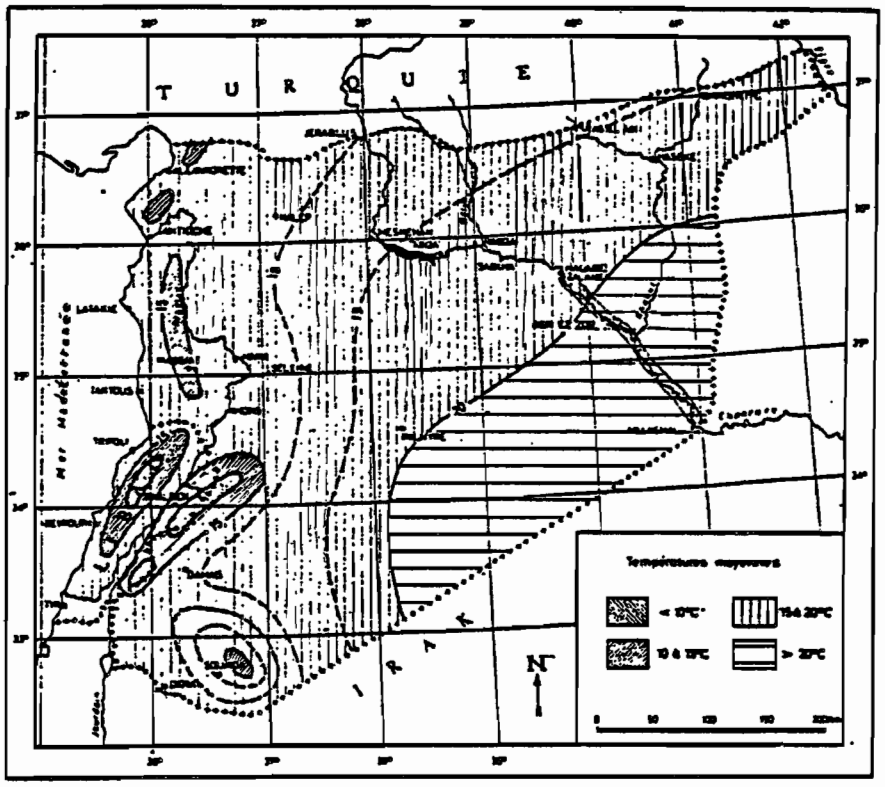


Fig. 5 - Carte des températures moyennes en Syrie
(COMBIER, 1945)

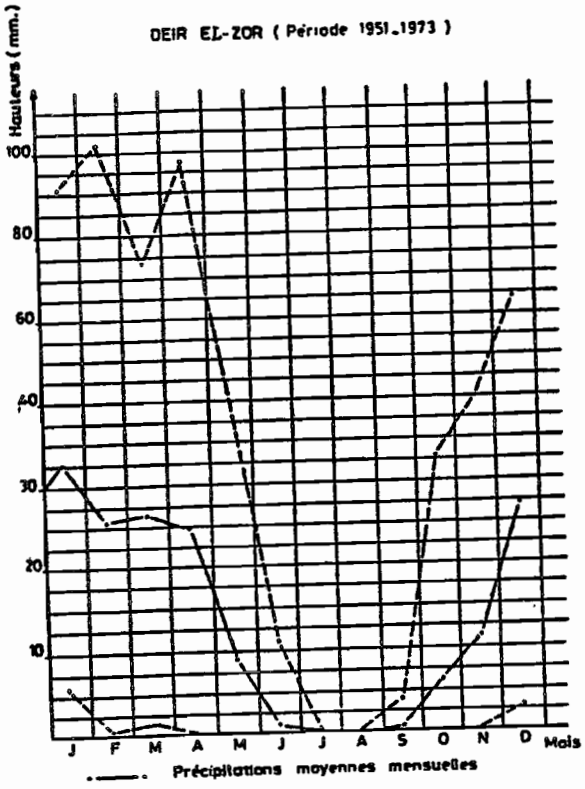


Fig 7 Précipitations mensuelles maximum, minimum et moyennes a Deir EL-Zor

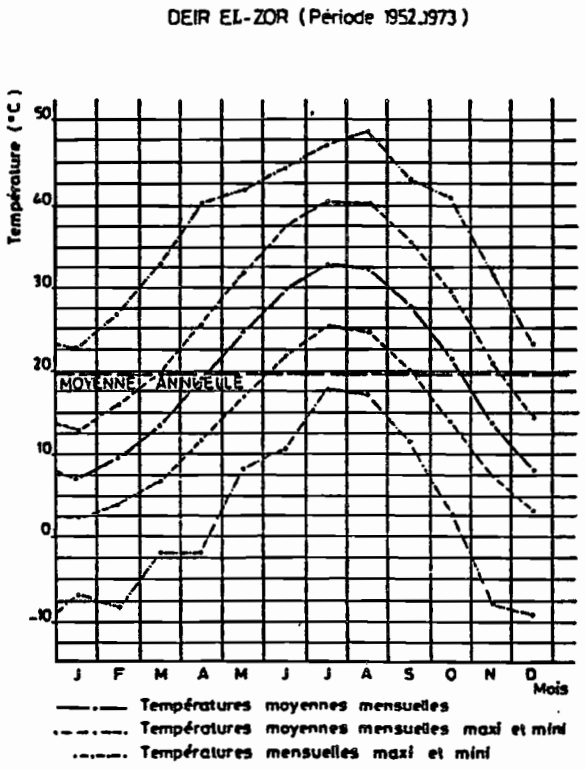


Fig.6 Températures moyennes mensuelles à Deir EL-Zor

2.2.1.2. La région de Grignon (25 km Ouest de Paris).

Zone de plateau d'altitude 110 m, en replat entre les collines et plateaux surélevés de Marly - les Alluets au Nord et de Trappes au Sud, recoupée par des vallées étroites : ru de Gally et ru Maldroit (AUBERT à paraître 1985).

2.2.2. Le climat.

2.2.2.1. La vallée de l'Euphrate.

Le climat dans cette région est de type "franc-saharien" (COMBIER, 1945). Les principales caractéristiques climatiques sont illustrées par les données de la station de DEIR-EL-ZOR (période de 1952 à 1973).

a) Les températures.

La zone de prélèvement est située dans la région la plus chaude de la Syrie (Température moyenne annuelle 20,1°C (Rapport GERSAR - SCET, 1977) (Fig 5).

Les températures moyennes mensuelles, moyennes mensuelles des maxima et minima sont données sur la figure 6.

On note que les températures les plus fortes sont atteintes pendant les mois de juillet et août. Les mois les plus frais s'étendent de novembre à avril, les plus basses températures se situant en décembre et janvier.

Autour d'une moyenne annuelle de 20°C, un maximum (moyen) en juillet de 35°C (40,8 en juillet 1980) et un minimum (moyen) en janvier 3°C (0,4°C en janvier 1980) sont observés. Ce maximum (moyen) est beaucoup plus faible à la région de Grignon (cf. 2.2.2.2.).

Les températures du sol (5 à 20 cm) varient en 1980 de 7,1 (janvier) à 32°C (juillet).

Une comparaison des températures et des précipitations de la région de l'Euphrate (fig. 6 et 7) et celle de Grignon (fig. 8 et 9) montre avec clarté la différence très importante entre ces deux régions.

b) Les précipitations :

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles, maximum et minimum mensuelles, sont portées pour la station de Deir El-Zor (période 1951-1973) sur la figure 7. Les totaux moyens annuels sont de 163 mm ;les mois les plus secs sont juillet et août (o mm) tandis que le mois de la plus forte pluviosité est le mois de janvier (35 mm de moyenne mensuelle). La période la plus sèche (< 10 mm par mois) s'étend de mai à octobre. Il n'y a absolument pas de comparaison entre Deir El-Zor et Grignon où il n'y a pas de période sèche (voir fig. 9). Pour l'année 1979-80 la précipitation totale mensuelle est de zéro pour les mois de septembre, juin, juillet et août, avec une transpiration journalière (bassin de transpiration) la plus élevée de l'année (8,5 ; 10,3 ; 17,2 ; 20,5 et 15,5 mm/jour) respectivement pour ces 4 mois (source des données ACSAD, Communication personnelle). L'humidité relative moyenne (période 1952 - 1973) est de 47 % avec un maximum (moyen) de 75 % au mois de janvier et un minimum (moyen) de 27 % aux mois de juillet et août. On peut en conclure que l'apport d'eau est essentiel pour les cultures dans cette zone et que la remontée de sels y compris les borates poserait des problèmes d'accumulation de cet élément dans les couches arables du sol. Il importe par conséquent de surveiller ce risque sur le terrain en analysant d'une façon systématique les eaux et les sols.

2.2.2.2. La région de Grignon.

Le climat de cette région est tempéré (moyenne annuelle 10,5°C) ; il est plus humide que celui de l'Euphrate (précipitation moyenne annuelle à Grignon 644 mm contre 163 mm à la région de l'Euphrate).

Les principales caractéristiques climatiques sont illustrées par les données de la station de l'INA à Grignon (période de 1957 à 1978).

a) Les températures :

Nous avons tracé sur la courbe de la fig. 8 les températures moyennes mensuelles ; nous constatons que les températures les plus fortes sont atteintes pendant les deux mois de juillet et août (respectivement 16,4 et 16°C) ; ces températures restent beaucoup plus

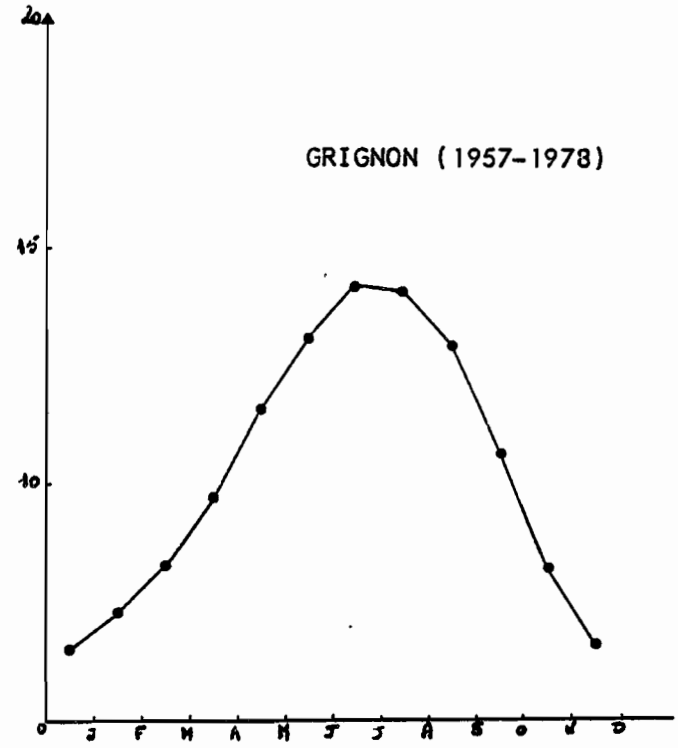


Fig.8 - Température moyenne mensuelle à Grignon

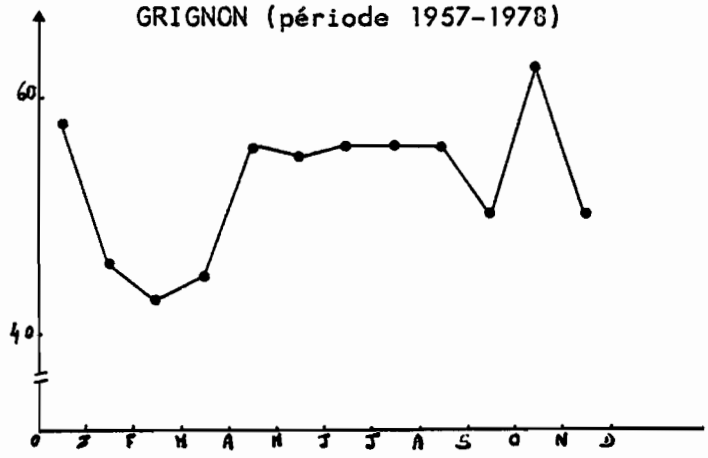


Fig. 9 - Précipitation mensuelle moyenne à Grignon.

faibles que celles de la région de l'Euphrate pour cette même période (voir fig. 6). Autour d'une moyenne annuelle de 10,5°C, une moyenne mensuelle maxima en juillet (18,4°C), et une moyenne mensuelle minima en janvier (3,1°C) sont observées.

b) Les précipitations.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles de la même station de l'INA à Grignon sont illustrées sur la figure 9 et portent sur la période de 1957 à 1978. Les moyennes mensuelles sont beaucoup plus élevées que celles de la région de l'Euphrate. Les moyennes mensuelles les plus élevées sont observées pendant le mois de novembre (63 mm) et les plus faibles sont celles du mois de mars (43 mm) ; il est important de signaler que la différence entre les moyennes mensuelles les plus élevées et celles les plus faibles n'est pas importante ; elle l'est encore moins quand on la compare avec celle de la région de l'Euphrate.

La précipitation la moins élevée ne correspond pas aux mêmes mois que ceux de la région de l'Euphrate. D'autre part, on n'observe pas une période sèche dans la région de Grignon (voir fig. 9)

2.2.3. Le cadre géologique, géomorphologique et hydrologique.

2.2.3.1. La région de la vallée de l'Euphrate.

DUBERTRET, (1979) a décrit la nature lithologique du bassin versant de l'Euphrate (fig. 10) on constate que les zones d'alimentation du fleuve y sont en majorité constituées de plateaux et massifs calcaires associés à des laves basaltiques.

La basse vallée de l'Euphrate est de formation à dominantes marneuses et gypseuses du Mi-Pliocène. Un épanchement basaltique sub-horizontal datant du plio-quaternaire, couronne les hauteurs voisines de Halabia-Zalabia. Un appareil volcanique plus récent du quaternaire moyen ou supérieur est visible à quelques kilomètres en amont de Deir El-Zor.

Les sols correspondent à un remplissage alluvionnaire quaternaire d'une quinzaine de mètres d'épaisseur moyenne compor-

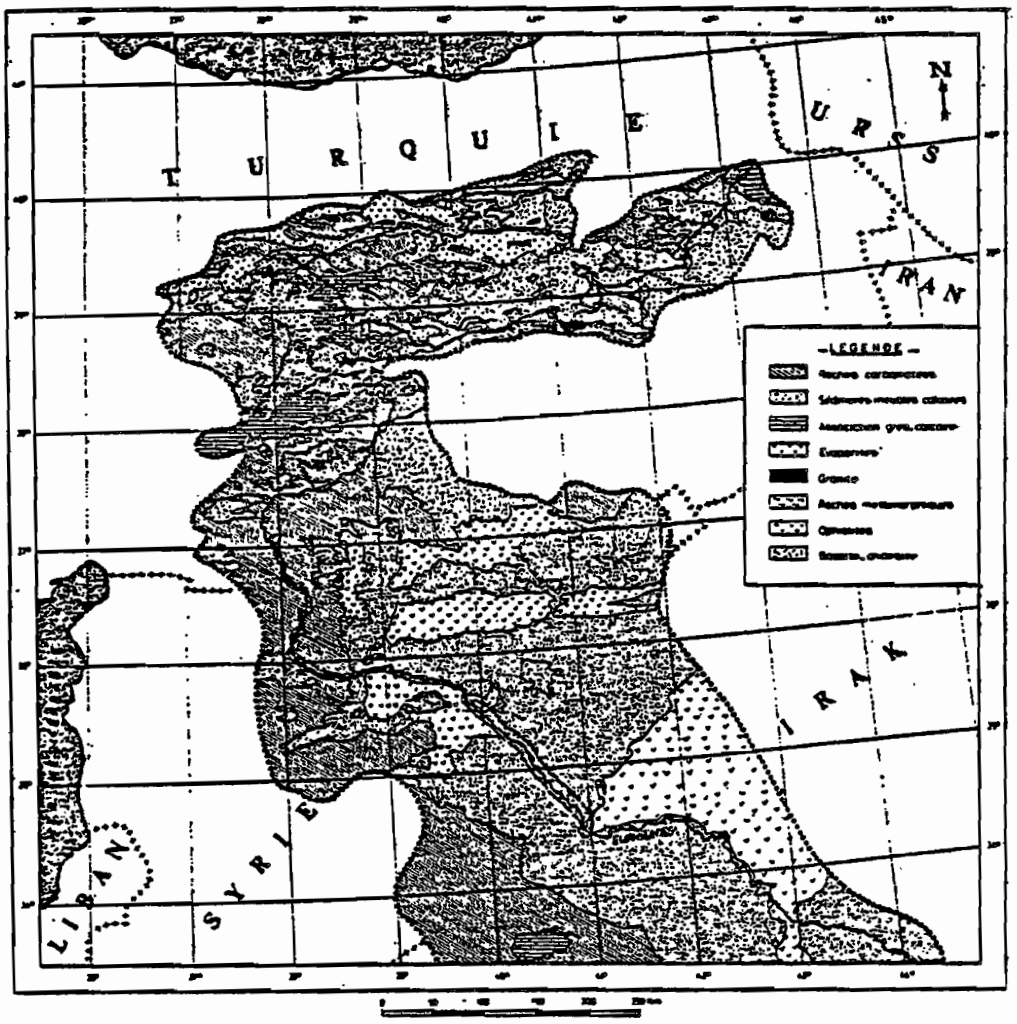


Figure 10 - **Carte lithologique du bassin versant de l'Euphrate**
(DUBERTRET, 1979)

tant, à la base, un horizon grossier formé de galets, graviers et sables et au sommet un horizon d'alluvions fines (limons plus ou moins argileux ou sableux). L'épaisseur des alluvions varie d'une valeur nulle (graviers affleurant) à une dizaine de mètres ; l'interface limons-graviers s'avérant très irrégulière. La couche des graviers a aussi une épaisseur très variable comprise entre 1 et 15 mètres. Aucun surcreusement particulier du substratum n'a pu être mis en évidence (DOSSO, 1980).

La formation alluviale de la basse vallée appartient au quaternaire et à l'Holocène.

Trois aquifères principaux ont été identifiés (GERSAR - SCET, 1977) :

1 - L'aquifère régional profond miocène : les connaissances sont limitées sur cet aquifère ; il ne semble pas être en relation avec l'aquifère alluvial de la vallée de l'Euphrate.

2 - L'aquifère superficiel du plateau Plio-Miocène : le réservoir de cet aquifère est double et contient :

- La série marno-gypseuse plus ou moins altérée ou fissurée du plateau proprement dit. Il est alimenté par l'infiltration des précipitations exceptionnelles ou des concentrations locales d'eaux de crues.
- Les dépôts alluviaux des Wadis latéraux plus transmissibles, ont un rôle drainant vis à vis du réservoir précédent et sont en outre rechargés par l'infiltration des crues.
  Cet aquifère alimente le système alluvial de la Basse Vallée de l'Euphrate, mais ses apports sont faibles sauf au débouché des Wadis latéraux.
  Ces eaux ne sont pas très salées ; leur conductivité est comprise entre 2 et 10 mmhos/cm.

3 - L'aquifère alluvial. Cet aquifère est directement rattaché à la rivière l'Euphrate et mérite d'être plus développé. Le réservoir de cet aquifère est constitué A la base par une série de dépôts alluviaux grossiers (galets et graviers) couvert par un horizon sableux.

- Au sommet par une série d'alluvions fines (limons plus ou moins argileux ou sableux)

Ce réservoir est limité verticalement par le substratum marno-gypseux qui se trouve à une profondeur moyenne de 10 à 20 m ; transversalement il est limité par l'Euphrate et la falaise du plateau Plio-Miocène. Ces limites, la structure bi-couche du réservoir, la position drainante de l'Euphrate et l'apport important dû aux réinfiltrations des irrigations permettent d'expliquer l'essentiel des mécanismes hydrodynamiques de cette nappe.
A cause du contraste important des perméabilités des deux couches, on peut considérer que les limons sont essentiellement le siège de transferts verticaux, tandis que les écoulements horizontaux se font dans la couche de graviers située au-dessous.
En période d'irrigation, l'apport à la nappe est plus important que le débit que peut évacuer la couche des graviers vers l'Euphrate ; la nappe monte alors sous l'effet de cet apport excédentaire. Une partie de cet excédent est stockée dans la couche limoneuse et l'autre reprise par évaporation à partir des flaques ou directement depuis la nappe par l'intermédiaire des remontées capillaires, et le bilan s'équilibre. Ce phénomène d'évaporation de la nappe entraîne la salinisation des sols.
En ce qui concerne la salinité des eaux , des mesures systématiques de la conductivité de l'eau de la nappe alluviale permettent de dégager schématiquement les tendances suivantes :

- En bordure de l'Euphrate on note une bande très peu salée (< 2 mmhos/cm).
- Une deuxième zone s'étend jusqu'au pieds du tallus de la terrasse sub-récente avec une conductivité inférieure à 4 mmhos/cm.
- L'eau de la terrasse sub-récente est beaucoup plus salée sa conductivité atteint en moyenne 10 mmhos/cm avec parfois quelques auréoles en position centrale dont la conductivité dépasse 20 mmhos/cm.

L'irrigation de cette vallée existe depuis la plus haute antiquité. Les écrits de la bibliothèque de Mari (2500 ans avant J.C.) en témoignent. Du 8ème au 13ème siècle de notre ère, de vastes réseaux d'irrigation gravitaire se sont développés dans la région de Mouhassan et d'Abou Leil (sur l'Euphrate au sud de Deir El-Zor). Mais au total, jusqu'avant la deuxième guerre mondiale, la vallée n'était irriguée et cultivée qu'en bordure proche de l'Euphrate, par de norias entraînées par les animaux. Plus tard, le développement des moyens de pompage (pompes à moteurs) a permis la mise en culture de surfaces plus importantes ; cette extension s'est accélérée brutalement dans les années 1950 avec le développement de la culture du coton. Malheureusement, l'extension de l'irrigation n'a pas été de pair avec une maîtrise réelle de l'eau, ce qui, en milieu aride, et avec les caractéristiques qui viennent d'être décrites, conduit inévitablement à des problèmes de salinité, et probablement à l'accumulation du bore dans les sols qui finalement durent être abandonnés.

2.2.3.2. La région de Grignon

Il s'agit d'un plateau recouvert de limon quaternaire épais au moins de 1m 50 à 2 m.

Le plateau supérieur repose sur argile à meulière de Montmorency puis sur épaisse couche de sables de Fontainebleau avec marne à la base (Stampien). Ce plateau forme un replat limon reposant sur calcaire grossier généralement sablo-graveleux du Lutétien, suivi d'une faible couche d'argile du Sparnassien et de craie blanche à silex (Crétacé) où les petites rivières ont creusé leur lit. Les nappes d'eau sont présentes dans les vallées au dessus de l'argile plastique et à la base du sable de Fontainebleau.

II.2.3. Description des profils des sols étudiés.

2.3.1. Sol peu évolué sur alluvion argilo-limoneuse

Les échantillons ont été prélevés à BANI-TAGLEB (station agronomique de l'ACSAD) à l'altitude de 203 m ; c'est une plaine qui fait partie de la première terrasse de l'Euphrate à roche mère

d'alluvions limoneuses. Nous pouvons donner la description générale suivante pour le sol étudié dans cette station : sol d'alluvions récentes de l'Euphrate, limoneux à pellicule durcie en surface.

Nous donnons ici la description du profil de ce sol :

0 - 12 cm : brun pâle (10 YR 6/3) sec, brun (10 YR 5/3) frais, limoneux, structure moyennement développée, massive, se divisant en polyédrique subangulaire fine à grossière, friable à frais, très dur à sec, peu collant, peu plastique, calcaire, racines rares fines à moyennes, pores rares fins tubulaires, transition distincte.

12 - 21 cm : brun (10 YR 5/3) frais, limoneux, faiblement développé, massif, friable à frais, peu collant, peu plastique, calcaire, racines rares fines à moyennes, pores rares très fins tubulaires, transition distincte.

21 - 38 cm : brun jaunâtre foncé (10 YR 4/4) frais, argilo-limoneux, moyennement développé, polyédrique subangulaire à angulaire, fine à moyenne, friable à frais très plastique, racines rares fines à grossières, pores très fins à fin tubulaires abondants, transition distincte.

38 - 70 cm : brun foncé (10 YR 4/3) frais, limoneux, moyennement développé, polyédrique subangulaire fine, friable à frais, peu collant, peu plastique, calcaire, racines rares, fines à moyennes, pores très fins, nombreux tubulaires, transition distincte.

70 - 104 cm : de même qu'à 38-70 cm, plus la présence de cristaux de gypse (5 %).

104 - 150 cm : brun (10 YR 5/4) frais, limono-argilo-sableux, moyennement développé, polyédrique subangulaire fine, friable à frais, peu collant, peu plastique, calcaire, accumulation de gypse en petits cristaux, pores très fins, nombreux tubulaires.

2.3.2. Sol brun lessivé sur limon.

Les échantillons sont prélevés dans un sol au parc de Grignon - Lieu dit Folleville - à l'altitude de 123 m, à la bordure de plateau et sous végétation : Taillis de hêtres et de chênes, quelques châtaigniers, sous-bois de mercuriales. Le substratum est un limon peu épais reposant sur calcaire Lutétien. Le profil suivant a été observé :

0 - 12 cm, A 11 : brun gris foncé (10 YR 4/2), texture limoneuse, structure grumeleuse moyenne et fine, frais, nombreuses racines, non calcaire, transition distincte.

12 - 30 cm, A 12 : brun jaune foncé (10 YR 4/4) frais, texture limoneuse, structure polyédrique fine, agrégats peu consistants, nombreuses racines, conduits de vers, transition distincte.

30 - 45 cm, A 3 : brun jaune (10 YR 5/6) frais, texture limoneuse, structure polyédrique moyenne, agrégats peu consistants, racines, conduits de vers, transition graduelle.

45 - 60 cm, B 1 : brun franc (7,5 YR 5/6), frais, texture limoneuse, structure polyédrique moyenne et grossière, sous-structure polyédrique fine, racines, revêtements argileux peu visibles, transition diffuse.

60 - 75 cm, B 2 : brun (7,5 YR 5/4) frais, texture limono-argileuse, structure polyédrique grossière, sous-structure polyédrique moyenne, racines, revêtements argileux (10 YR 5/6), transition nette.

A partir de 75 cm, Cca : beige foncé (10 YR 6/4) frais, texture limoneuse, vive effervescence à HCl-pseudomycelium de $CaCo_3$, Ca, structure massive, peu de racines.

2.3.3. Sol de rendzine sur calcaire sablo-graveleux (Lutétien)

Les échantillons sont prélevés dans un sol au parc de Grignon également - chemin de Folleville à l'altitude de 110 m à Topographie mi-pente, pente moyenne sous végétation de hêtres et de mercuriales et à substratum calcaire grossier - Lutétien. Le profil observé dans ce sol est le suivant :

0 - 5 cm, A 11 : brun gris foncé (10 YR 4/2) frais, texture argilo-limoneuse, structure grenue fine, graviers et cailloux calcaires, nombreuses racines, transition distincte.

5 à 35-50 cm, A 12 : brun clair (10 YR 5/3) frais, texture limono-argileuse, structure grumeleuse fine et moyenne, graviers et cailloux calcaires abondants, nombreuses racines, transition nette, ondulée.

A partir de 35-50 cm, C : jaune pâle et bandes ocre-jaune, (10 YR 7/8), frais, texture sablo-limaneuse, structure massive, cailloux irrégulièrement répartis, quelques racines.

II.2.4. Caractéristiques des sols.

Nous donnons ci-dessous les caractéristiques des sols étudiés prélevés de 0 à 40 cm. Les résultats sont regroupés pour les trois types de sols afin de mieux les comparer.

2.4.1. Analyse physique.

2.4.1.1. Analyse granulométrique

Cette analyse a été effectuée sans décarbonatation des échantillons, selon la méthode suivie au laboratoire de physique des sols de l'ORSTOM (Bondy) (destruction de matière organique suivie de dispersion par pyrophosphate de sodium et prélèvement par la pipette de Robinson et tamisage). Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Analyse granulométrique (en 10^{-2} du sol sec à l'air s.s.a.) des échantillons de :

1 - sol peu évolué sur alluvions (Basse vallée de l'Euphrate)
2 - sol brun lessivé sur limon (chemin Folleville - Grignon)
3 - sol de rendzine sur calcaire (chemin Folleville - Grignon).

Sol	Prof. cm	Arg. < 2µ	Limon fin 2à20µ	Limon gros. 20à50µ	Sable fin 50à200µ	Sable gros. >200 µ	Mat. org. %	pH	
								H_2O	KCl
1	0-40	31,5	30	12,2	17,6	4,0	1,1	8,5	7,6
2	0-40	17,9	20,6	50,0	5,0	1,0	3,5	6,3	5,3
3	0-40	26,6	23,0	17,0	8,0	12,0	10,2	7,9	7,3

La comparaison du tableau des textures montre que dans les prélèvements agronomiques (0-40 cm) le sol peu évolué sur alluvions est le plus riche en argile granulométrique, en limon fin et en sable ; la texture de ce sol est plus fine que celle des deux autres. Le pH de ce sol est plus fort que celui des deux autres et surtout que celui du sol brun lessivé. En matière organique le sol peu évolué sur alluvions est pauvre. Sa teneur en cet élément est beaucoup plus faible que celle du sol brun lessivé et surtout de la rendzine (respectivement

a) TRIANGLE DES TEXTURES (I.N.R.A.)

b) Triangle U.S.D.A.

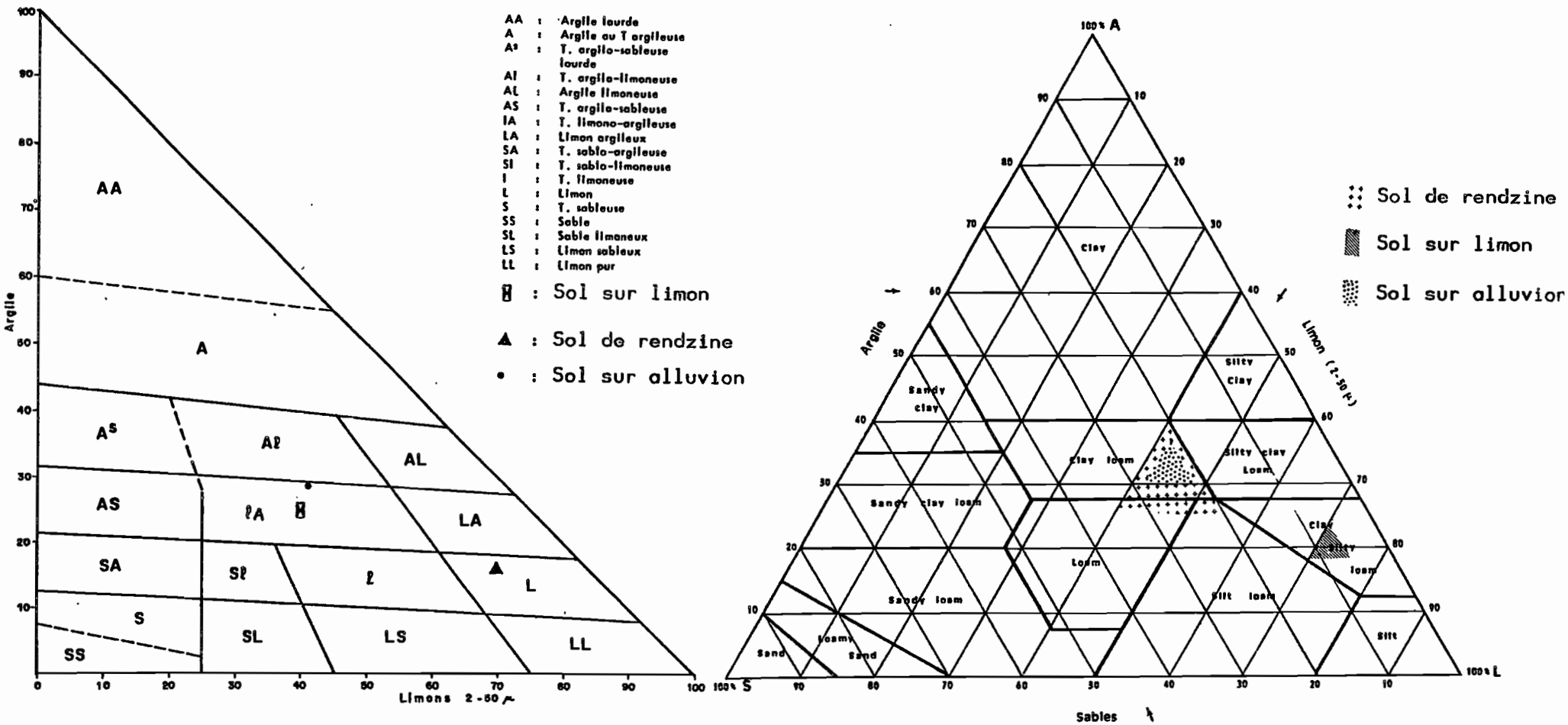


Fig.11 - Distribution des textures des sols étudiés.

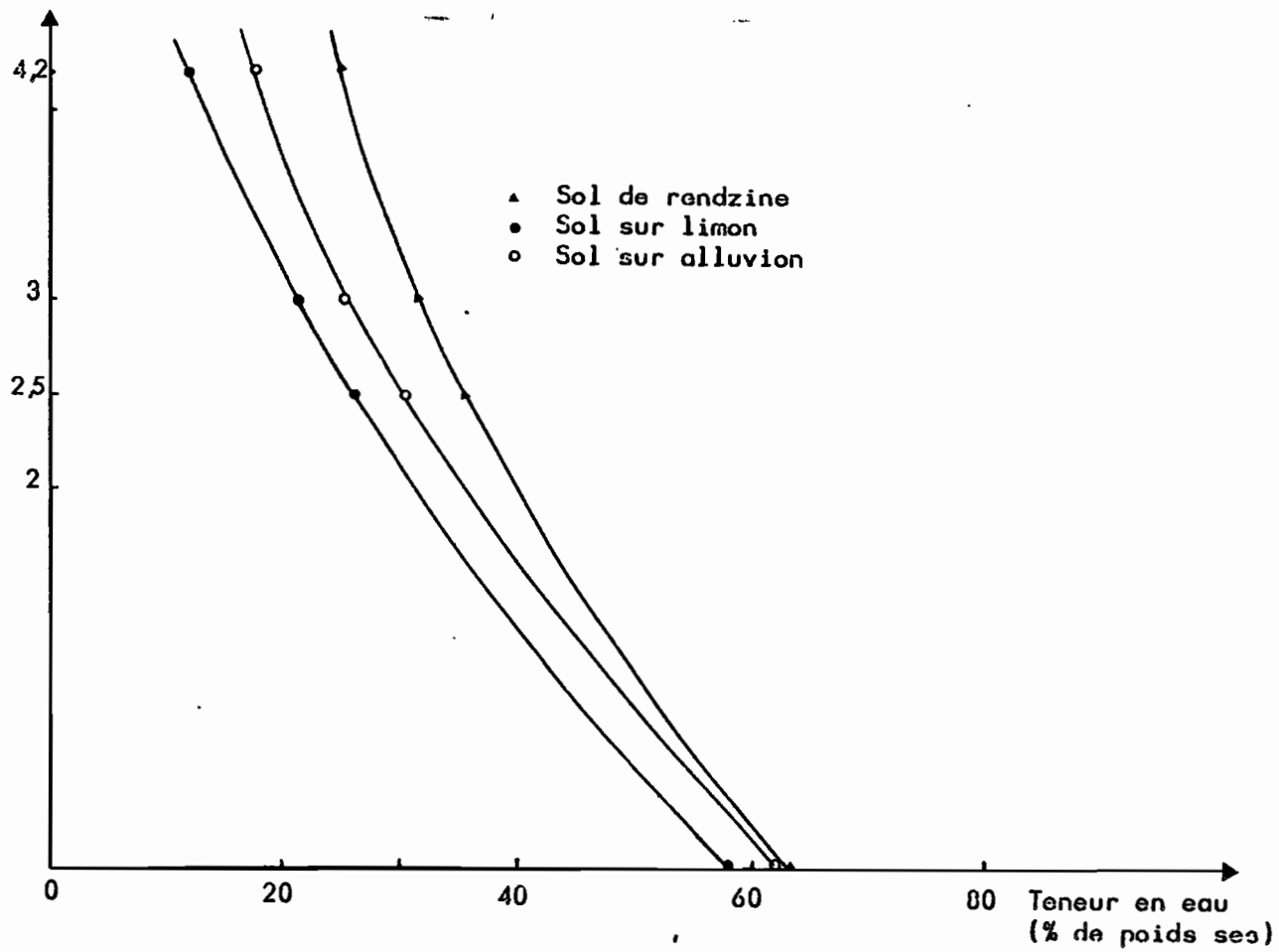


Fig. 12 - Courbe d'humidité/PF pour les trois sols étudiés.

1,1 % contre 3,5 % et 10,2 %). Les figures 11a et b montrent la distribution de texture pour les trois types des sols étudiés selon le triangle de "soil manual survey" et celle de l'INRA. Ces indications sont importantes pour notre travail dans la comparaison des résultats de culture sur ces sols ; elles aident aussi à comprendre le mauvais indice d'instabilité structurale du sol peu évolué sur alluvions (5,5) (cf tableau 6) dans lequel la pauvreté en matière organique et le pourcentage élevé d'argile et de limon fin pourrait être à l'origine de cette mauvaise stabilité structurale.

2.4.1.2. Courbe de l'humidité/PF

Nous avons jugé nécessaire de dresser la courbe de PF de nos sols pour régler l'arrosage des sols dans les pots. Nous regroupons les résultats des trois sols étudiés dans le tableau 5, et la figure 12.

Tableau 5 : Courbe de l'humidité/PF

Sol \ PF	4,2	3,0	2,5	0 (saturation)
Brun lessivé sur limon	11,81	21,02	27,62	58,30
Rendzine sur calcaire Lutétien	24,43	30,41	35,35	63,26
Peu évolué sur alluvions	17,39	25,12	30,45	62,28

Les mesures sont effectuées par la méthode suivie au laboratoire de physique des sols de l'ORSTOM (Bondy).Sans entrer dans les détails de l'étude des courbes d'humidité aux divers P F, on constate que pour les mêmes pressions, le sol brun lessivé sur limon retient le moins d'eau et que le sol de rendzine sur calcaire proche du sol peu évolué sur alluvions pour le P F0 s'en éloigne ensuite et se

rapproche plus du premier au dessus de PF3. Les valeurs élevées des humidités aux différents PF dans le sol de rendzine s'expliquent par sa richesse en matière organique et la dominance de la montmorillonite dans son argile. Les valeurs encore importantes d'humidité aux différents pH du sol peu évolué sur alluvion en particulier pour PF0, malgré sa pauvreté en matière organique proviennent de sa richesse en argile de type montmorillonitique.

2.4.1.3 . Agrégats et stabilité structurale.

La stabilité structurale, aptitude des agrégats à résister aux forces de dégradation, est représentée par l'indice d'instabilité structurale (Is), d'autant plus faible que la stabilité est plus forte.

La structure apparente massive du sol sur alluvions dans les pots de culture et sa richesse en limon fin ainsi que sa pauvreté en matière organique ont montré qu'il serait intéressant de comparer l'indice de l'instabilité structurale (Is) à ceux des deux autres sols. Les mesures d'Is sont effectuées dans le laboratoire de physique des sols de l'ORSTOM (Bondy). Ces mesures s'avèrent très intéressantes, elles sont regroupées dans le tableau 6.

Type de sol	Horizon	Agr.A -0,9 s.g. %	Agr.E -0,9 s.g. %	Agr.B -0,9 s.g. %	$\overline{M}$ %	Argile + limon %	Is
Sol sur alluvion	0-40cm	26,02	4,32	1,3	10,5	58,0	5,5
Sol de Rendzine	0-40cm	57,3	58,5	61,4	59,1	3,5	0,1
Sol sur limon	0-40cm	20,6	19,0	34,9	24,8	10,0	0,4

Tableau 6 : Agrégats et stabilité structurale des différents sols étudiés.

Sans entrer dans le détail de l'étude de la stabilité structurale, une corrélation étroite existe entre le taux de matière organique et plus particulièrement de carbone et l'indice Is. L'indice Is très mauvais du sol peu évolué sur limon des régions arides correspond à un pourcentage de carbone très faible 0,62 % et à un taux de matière organique très faible aussi 1,1 % ; cet indice s'améliore avec l'augmentation du taux de carbone,

, et de matière organique (un bon indice Is) dans le sol brun lessivé sur limon où il n'est que de 0,4 pour 3,5 % de matière organique et 2,05 % de carbone. Le meilleur indice Is est celui du sol de rendzine (0,1 pour 10,2 % de matière organique et 5,92 % de carbone).

Si on considère deux éléments de la structure, représentés l'un, la cohésion, par les agrégats à l'alcool (A), l'autre, la mouillabilité, par les agrégats au Benzène (B) (MONNIER, 1965), une corrélation peut être établie entre chacun de ces deux éléments et le taux de carbone. La cohésion est améliorée à des taux de carbone supérieurs à 1 %, tandis que la mouillabilité est diminuée par des taux croissants de matière organique. (le plus riche en argile 31,5 % et le plus pauvre en matière organique 1,1 % - voir tableau 4).

Dans le sol sur alluvion, les agrégats se dispersent peu: après le prétraitement à l'alcool (Agr.A -0,9 s.g) et beaucoup moins encore sans traitement (Agr.E -0,9 s.g) et après prétraitement au benzène (Agr.B -0,9 s.g) (tableau 6).

L'indice Is nettement mauvais (5,5) du sol de la basse vallée de l'euphrate nous a incité à faire les analyses de la salinité de ce sol et établir le rapport Na^{+}/Ca^{2+}, il est en réalité plus élevé (mauvais) dans ce sol 0,1 contre 0,4 dans le sol calcaire sur rendzine, le S.A.R (sodium Adsorption Ratio = $Na/\sqrt{(ca + Mg)/2}$) mesuré sur extrait aqueux ½ est de 0,60 et le Na total est de 8,45 meq/100 g de sol. Nous ne pouvons pas à la suite de ces analyses, incriminer le sodium d'être à l'origine de cette stabilité structurale très mauvaise. Cependant elle reste un danger lié à la pauvreté en matière organique et à sa teneur élevée en limon fin qui menace la culture dans la vallée de l'Euphrate, surtout en cas d'irrigation.

Il faut être vigilant dans le contrôle systématique et régulier de ces sols qui constituent une richesse nationale menacée.

2.4.2. Principales caractéristiques chimiques des sols.

Les analyses chimiques sont faites dans les laboratoires de chimie des sols de l'ORSTOM (Bondy), les résultats exploratoires des trois sols sont donnés dans le tableau 7 :

Tableau 7 : Analyse chimique (sur sol sec à l'air = s.s.a.) des :
- 1-sol peu évolué sur alluvions,
- 2-sol brun lessivé sur limon,
- 3-sol de rendzine sur calcaire.

Profond. cm	Ca Ca_3 %		M.O. total %	C ‰	N ‰	C/N	Complexe absorbant meq/100 g (s.s.a.)					C.E. % meq	(V%)
	total	actif					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Σ		
0-40 (1)	24,2	5,5	1,1	6,21	0,738	8,4	(47,50)*	7,50	0,97	0,57	-	19,0	100
0-40 (2)	trace	-	3,5	20,5	1,85	11,1	10,0	2,50	0,36	0,10	12,96	16,0	81
0-40 (3)	22,7	5,5	10,2	51,2	4,13	12,4	30,3	8,50	0,54	0,14	39,48	40,5	97

* Une partie du calcium du calcaire dissoute pendant l'extraction est à l'origine de ce chiffre très élevé.

2.4.2. 1. Complexe absorbant (extraction par CH_3 COO (NH_4) M à pH7)

Les données consignées dans le tableau 7 montrent une gamme variée des résultats, fonction de la quantité et de la nature des minéraux argileux et de la matière organique. Les caractères suivants peuvent être dégagés de ces résultats :

- sur le complexe absorbant c'est le cation calcium Ca^{2+} qui domine largement..

- La capacité d'échange relativement plus élevée du sol sur alluvion par rapport au sol brun lessivé sur limon peut s'expliquer par la teneur en argile plus élevé et par la nature de ces argiles à capacité d'échange élevée dominant dans ce sol (en ordre décroissant smectite (montmorillonite), chlorite, illite, palygorskite tandis que la kaolinite n'est présente qu'en trace). Le sol de rendzine sur calcaire a la capacité d'échange la plus élevée parce qu'il est le plus riche en matière organique et il est riche en argile de capacité d'échange élevée (montmorillonite et illite).

- Le magnésium marque une présence relativement importante dans les trois sols mais le sol de rendzine est plus riche en magnésium, on pourrait penser à une relation de causalité avec le dolomite de ce sol.

- Le potassium n'existe qu'en faible teneur < 1 méq %. Le sodium même s'il est faible dans les trois sols, sa teneur dans le sol sur alluvion (région aride) dépasse largement celle des sols des régions humides (voir tableau 7). Le rapport Na/T reste cependant très faible.

- Le taux de saturation du sol de région aride est plus élevé que celui des sols des régions humides.

2.4.2.2. Matière organique.

Les résultats du tableau 6 montrent que le carbone organique (dosé par la méthode à froid de Walkey et Black) est faible dans le sol peu évolué sur alluvion par rapport aux autres sols, mais on note que dans ce sol le taux de l'azote organique est relativement élevé (méthode Kjeldahl et dosage colorimétrique) par rapport à celui du carbone organique ce qui diminue le rapport C/N dans ce sol.

Enfin il importe de tenir compte du pourcentage élevé de calcaire actif (dosé par la méthode DROUINEAU) par rapport au calcaire total (dosage par acidimétrie) des sols (voir tableau 7) surtout dans les régions arides par suite de son rôle génant dans l'absorption du fer et du manganèse ; d'ailleurs une partie du calcium de ce calcaire peut être solubilisé pendant l'extraction de complexe absorbant et augmentra la quantité de Ca^{2+} considérée faussement comme calcium de complexe absorbant (voir tableau 7).

2.4.2.3. Données analytiques diverses.

Nous avons jugé utile de faire le dosage des cations totaux des sols, ce qui nous donne une idée sur le rapport entre ce qu'on appelle "les réserves nutritionnelles" des sols et les cations qui pourraient être disponibles dans l'immédiat dans la solution du sol.

Les résultats sont donnés dans le tableau 8. L'extraction est faite par attaque d'acide nitrique 13 N (15 ml pour 0,4 g de sol sec à l'air) et les dosages sont effectués par spectrométrie d'absorption atomique (calcium et magnésium), émission pour le potassium et le sodium, et pour le phosphore, par colorimétrie.

Pour mieux montrer les rapports entre cations totaux et cations extractibles et pour faciliter la comparaison de ces rapports entre les sols nous avons chiffré ces rapports dans le tableau 9.

Tableau 8 : Résultats exploratoires du dosage des cations totaux et extractibles (P_2O_5) dans les trois sols étudiés :
- 1-sol peu évolué sur alluvion,
- 2-sol brun lessivé sur limon,
- 3-sol rendzine sur calcaire lutétien.

	Profond. cm	Cations totaux méq/100g s.s.a. HNO_3 13 N				P_2O_5 10^{-3}	
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Total	extr.méth. (OLSEN)
1	0-40	589,2	164,7	14,1	8,45	1,5	0,143
2	0-40	82,0	15,9	8,3	1,9	0,41	0,036
3	0-40	712	111	6,8	8,4	0,79	0,048

Les sols qui ont le plus de réserves sont les sols rendzine et peu évolué sur alluvion (1 et 3). Il est important de noter que malgré que le sodium total soit le même dans ces deux sols, le sodium extractible est 4 fois plus élevé dans le sol peu évolué sur alluvion que celui du sol de rendzine.

Tableau 9 : Rapport (en %) entre cations totaux et cations échangeables dans les trois sols étudiés (résultats obtenus à partir des données des tableaux 7 et 8).

Sol \ Cation	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	P_2O_5
Sol sur limon	12,2	15,7	4,3	5,3	8,8
Sol rendzine	4,3	7,7	7,9	1,7	6,1
Sol sur alluvion	8,1	4,6	6,9	6,7	9,5

On constate que les éléments alcalino terreux (Ca et Mg) sont les plus extractibles dans le sol brun lessivé sur limon, le pH faible (5,3 à KCl) de ce sol aurait un rôle dans cette extraction. Le sol sur alluvion est mieux pourvu en P_2O_5 et en potassium par rapport aux deux autres sols.

2.4.2.4. Analyses se rapportant au degré de salinité.

Les échantillons du sol provenant de la basse vallée de l'Euphrate et plus précisément de Bani-Tagleb (voir cartes fig. 3 et 4) proche de sols salés, nous avons jugé intéressant de mesurer leur salinité pour mieux comprendre le comportement des oligo éléments et plus particulièrement du bore dans ce sol.

Les mesures sont effectuées dans les laboratoires de chimie des sols de l'ORSTOM (Bondy) par les différentes méthodes d'analyse de la salinité, elles sont données dans les tableaux 10-1 à 10-4.

Les résultats obtenus n'ont pas fait ressortir un taux élevé en sodium qui inciterait à craindre une dégradation de l'état présent du sol, le "sodium adsorption ratio" SAR = 0,6 et la conductivité sur extrait saturé = 0,89mmhos/cm ne sont pas élevés et ne soulèvent pas un problème, cependant il ne faut en aucun cas éloigner le risque de l'évolu-

tion des sols surtout sodiques dans ces sols par accumulation et surtout par remontée avec les eaux de la nappe, car c'est le cas des sols voisins et très proches (voir paragraphe 2-2-3-1.)

Tableau 10 : Analyse de salinité du sol peu évolué sur alluvion .

10-1 : Mesure sur extrait aqueux (sol/eau=1/2)

Profond. cm	pH à 21°C	Conduct. m.mhos à 25°C	CATIONS (C.) meq. %				ANIONS (A) meq. %				ΣA	ΣC
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	So_4^{2-}	$H\ Co_3^-$	Co_3^{2-}		
0-40	8,1	0,47	0,52	0,20	0,03	0,16	0,16	0,23	0,49	0	0,88	0,91

Le SAR = $Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2} = 0,6$

10-2 : Mesure sur l'extrait de pâte saturé

Profond. cm	pH	Conduct. m.mhos à 25°C	CATIONS (C.) meq./100 g				ANIONS (A) meq./100 g			ΣA	ΣC
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	So_4^{2-}	$H\ Co_3^-$		
0-40	7,8	0,89	0,34	0,13	0,019	0,104	0,050	0,16	0,37	0,59	0,57

SAR = 0,21

Suite du tableau 10.

10-3 : Mesure sur extrait avec solvant (Ethanol 96°) traité préalablement au Benzène, NH^4 Cl à pH 7 et CH_3COO Na à pH 8,2

Profond. cm	CATIONS méq. %				ANIONS méq. %				ΣA	ΣC
	Co^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	So_4^{2-}	$H\ Co_3^-$	Co_3^{2-}		
0-40	0,06	0,02	0	0,14	0,16	0,05	0,03	0	0,24	0,22

SAR = 1,57

10-4 : Mesure sur extrait de la méthode NH^4 Cl M à pH 7 (sol/réactif = 20/250) épuisement éthanol 96°

Profond. cm	CATIONS (C) méq. %				ANIONS (A) méq. %				ΣA	ΣC
	Co^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	So_4^{2-}	$H\ Co_3^-$	Co_3^{2-}		
0-40	33,60	9,20	1,30	0,42	-	0,48	9,80	0	10,28	44,52

SAR = 0,086

10-5 : Mesure sur extrait obtenu par échange et dissolution par CH_3 COONa M à pH 8,2 (sol/réactif = 20/100).

Profond. cm	CATIONS méq./100g				ANIONS méq./100 g				ΣA	ΣC
	Co^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	So_4^{2-}	$H\ Co_3^-$	Co_3^{2-}		
0-40	12,0	8,2	0,90	/	/	0,64			0,64	21,1

Total Na à pH 8,2 = 20,6 m.é./100 g de sol sec à l'air (s.s.a)

2.4.3. DETERMINATIONS DES ARGILES.

Il s'agit de préciser quels sont les types des argiles (microcristaux phylliteux) ce qui nous aidera à mieux caractériser nos sols et certains comportements du bore et du manganèse dans ces sols. Nous avons essayé d'y parvenir par les trois méthodes complémentaires :

- Diffraction aux rayons X, c'est une interprétation de spectre des rayons X diffractés par les argiles (fraction $< 2\mu$) excités par un faisceau d'électrons, le diagramme de spectre obtenu permet de différencier, grâce à la comparaison des tables internationales, la nature des argiles contenues dans le matériel utilisé.

Pour mieux cerner les différentes argiles dans nos sols nous avons procédé à des analyses des agrégats orientés, normaux , chauffés et glycérolés.

En procédant à ces différentes analyses la diffractométrie permet de déceler des tendances et des variations de composition en comparant les résultats obtenus pour les différents sols. On verra disparaître les raies de telle ou telle argile. Le sens de variation est perceptible, même si l'intensité ne peut être estimée correctement.

- Analyse thermique différentielle (A.T.D.). C'est une mise en évidence de la quantité de chaleur résultant des transformations subies par l'échantillon (CAILLERE et al., 1982). L'ATD peut, en principe, être utilisée pour caractériser un minéral isolé ou un mélange, l'allure des courbes est souvent assez caractéristique pour que l'on puisse reconnaître les minéraux dans un mélange ; tout de même certains éléments peuvent réagir et modifier sensiblement les courbes des minéraux.

- La microscopie électronique est la seule technique permettant d'accéder aux images de microparticules d'argiles 0,01-0,1 μm. Elle fournit un moyen d'identification simple et rapide.

Nous avons tenté d'établir, à partir des résultats obtenus par ces trois méthodes (avec l'aide de Monsieur P. QUANTIN), le tableau 11 de répartition schématique, qui a le mérite de mettre en évidence plusieurs points:

Tableau 11 : Nature des minéraux argileux. Leurs proportions sur proportion totale de 10.

SOL	ARGILES	Leurs Proportions	SOL	ARGILES	Leurs Proportions	SOL	ARGILES	Leurs Proportions
Sol peu évolué sur alluvion (Basse Vallée de l'Euphrate)	SMECTITE	3	Sol de rendzine sur calcaire (GRIGNON)	SMECTITE	6	Sol sur limon (GRIGNON)	ILLITE "ouverte" I-M (mica très altéré)	8
	CHLORITE	2		ILLITE "ouverte" I-M	2		SMECTITE	1
	ILLITE "ouverte" I-M	2		DOLOMITE	1		KAOLINITE désordonnée	1
	PALYGORSKITE (Attapulgite)	2		PALYGORSKITE	0,5		Metohallozoïte en tube	
	CALCITE	0,5 à 1		KAOLINITE désord.	trace		Présence de Diatomé	-
	QUARTZ	trace		QUARTZ	trace		Produits "paracristallins" très fins	-
	KAOLINITE	trace					Interstratifié (smectite-chlorite)	trace
	FELDSPATH (kaolinite désordonnée)	trace					QUARTZ	trace

- L'importance de la smectite (très probablement montmorillonite) dans les sols de rendzine et sur alluvion. La montmorillonite de la smectite est mal cristallisée dans l'échantillon du sol brun lessivé sur limon, tandis que la kaolinite apparaît comme un minéral secondaire dans le sol de rendzine et le sol peu évolué sur alluvion de Holocène ancien.

- La chlorite est un minéral fréquent dans le sol peu évolué sur alluvion tandis qu'elle est absente dans les autres sols.

- La palygorskite (attapulgite) est importante dans le sol peu évolué sur alluvion, moins importante dans le sol de rendzine et n'est pas signalée dans le sol brun lessivé.

- La calcite est signalée uniquement dans le sol peu évolué sur alluvion ; Dans la rendzine il s'agit de dolomite.

- La capacité d'échange la plus élevée du sol de rendzine n'est pas étonnante quand on constate d'après le tableau 11 que les argiles dominantes sont les smectites et l'illite de capacité d'échange importante.

III - 3-CONCLUSION

Les données de ce chapitre montrent que le sol de rendzine sur calcaire a une bonne structure (Is = 0,1), une bonne texture, il retient bien l'eau (pour le même PF, il retient le plus d'eau) avec le meilleur rapport de C/N, son pH est faiblement basique, il est le plus riche en matière organique, il dispose de la capacité d'échange la plus élevée et d'argiles à forte capacité d'échange (smectite et illite surtout).

Le sol brun lessivé sur limon a une bonne structure mais moins bonne que la rendzine, sa texture est pauvre en argile et en limon fin, pour le même PF il retient le moins d'eau, son pH est faible par rapport aux autres sols. Sa teneur en matière organique ainsi que le rapport C/N sont intermédiaires par rapport aux deux autres sols. Il a une capacité d'échange moins importante que les deux autres sols.

Le sol peu évolué sur alluvion de l'holocène ancien est de mauvaise structure (Is = 5,5), il a la texture la plus fine (très riche en argile et en limon fin), son pH est assez élevé, il retient beaucoup d'eau (62 % à saturation), c'est un sol très pauvre en matière organique avec un pourcentage relativement élevé de carbone organique ce qui augmente le rapport C/N. Son complexe absorbant est intermédiaire, par rapport aux autres sols, avec une teneur très élevée de calcium échan-

geable et un taux plus élevé de Na échangeable que les autres sols. La conductivité est faible (0,89 mmhos conductivité de l'estrait de la pâte saturée). Les argiles sont de nombreux types avec une dominance de smectite ; la palygorskite, la chlorite et l'illite y sont présentes en teneurs semblables, un peu plus faibles que la précédente.

Si le sol peu évolué sur alluvion est plus riche en calcaire que les deux autres sols, cela peut s'expliquer par le fait que les sols de la basse vallée de l'Euphrate correspondent à un remplissage alluvionnaire quaternaire qui trouve son origine dans la nature lithologique du bassin versant qui est constitué en majorité de plateaux et de massifs calcaires.

Enfin les climats très différents sous lesquels évoluent les sols étudiés nous aide à comprendre la difficulté à cultiver le sol de la basse vallée de l'Euphrate et fait bien ressortir l'effort qu'il faut déployer pour la mise en valeur ou pour garder les valeurs culturales de ces sols.

CHAPITRE III

METHODE DE CULTURE

III-1 - DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET DU CYCLE DE CULTURE.

Etant donné la difficulté à maitriser au champ les conditions de nutrition en oligoéléments (complexité de la dynamique des oligoéléments, hétérogénéité du milieu, intéractions entre facteurs), une expérimentation en condition contrôlée s'avérait nécessaire à une étude précise de l'utilisation par les plantes des oligoéléments et particulièrement du bore et du manganèse.

Les plantes ont été cultivées en pots, dans une serre ordinaire, (sous condition naturelle), pendant la période qui convient au développement d'une variété de printemps, c'est-à-dire de mars à juillet au cours des deux années successives.

Un ombrage par des claies amovibles et une aération ont été mis en place pour éviter les radiations solaires directes lorsque cela était nécessaire. Ainsi les températures mensuelles moyennes maximales et minimales sont données par le tableau 12. L'humidité relative est généralement comprise entre 60 et 70 %.

Les pots espacés de 25 cm sont disposés en rangées distantes de 30 cm environ.

Quatre pulvérisations préventives de fongicides ont été appliquées au cours des deux expériences. Les produits utilisés alternativement sont : Bayleton 25 à raison de 2g/L et Hypnol (12ml/L).

Des dosages préalables des oligoéléments ont été effectués sur ces solutions pour s'assurer de leur teneur (Tableau 13). Ces résultats révèlent des teneurs négligeables surtout quand on sait que quatre litres par essai seulement ont été pulvérisés sur l'ensemble des pots.

TABLEAU 12 - TEMPERATURES (°C) MOYENNES MENSUELLES MINIMALES ET MAXIMALES ENREGISTREES DANS LA SERRE PENDANT LES EXPERIENCES.

Mois	Avril		Mai		Juin		Juillet	
Moyenne Mensuelle	1981	1982	1981	1982	1981	1982	1981	1982
Maximum	17,6	19	18,5	21,0	21,6	23,4	24,6	26,2
Minimum	8,7	9,9	10,0	12,3	14,1	14,0	15,4	15,7

TABLEAU 13 - TENEURS EN OLIGOELEMENTS EN G/ml DANS LES SOLUTIONS FONGICIDES UTILISEES.

Element / Fongicide	Mn	B	Cu	Fe	Zn
Bayleton25 2g/L	0,102	0,0042	0,00087	0,06	0,05
HYPNOL 12 ml/L	0,024	0,0067	0,0011	0,1	<0,008

1.1. Plan expérimental.

Nous avons monté notre expérience en plan factoriel à deux facteurs contrôlés de type (4^2)avec quatre répétitions par traitement.

Ce plan consiste à faire un seul bloc de 64 unités expérimentales entièrement randomisées (une seule permutation aléatoire de 64 pots 16x4. (voir tableau 14).

TABLEAU 14 - CARRE DU DISPOSITIF DES TRAITEMENTS (expérience factorielle 4^2.)

DOSES BORE (Dose de base 0,5 ppm).

Doses manganèse (Dose de base 1,0ppm) — Mn \ B	1 (0,5ppm)	6 (3 ppm)	11 (5,5ppm)	16 (8ppm)
1 (1ppm)	1 X 1	1 X 6	1 X 11	1 X 16
6 (6ppm)	6 X 1	6 X 6	6 X 11	6 X 16
11 (11ppm)	11 X 1	11 X 6	11 X 11	11 X 16
16 (16ppm)	16 X 1	16 X 6	16 X 11	16 X 16

Ce plan est parmi les plus utiles des dispositifs, il permet de faire face à de nombreuses situations expérimentales dans la pratique. Ce dispositif nous permet une analyse de variance dans laquelle l'ensemble des résultats est exploité globalement en distinguant les dispersions provenant de la variation des facteurs contrôlés (B et Mn),

de celles qui sont dues à l'interaction de ces facteursou à d'autres facteurs non contrôlés. Les données obtenues avec ce dispositif permettent de faire également d'autres analyses statistiques que nous donnerons dans la partie résultats de ce travail.

Le choix des doses a été fait en tenant compte de la sensibilité de la plante, des caractéristiques des sols et des études antérieures (ABO, 1980), nous avons jugé qu'une dose maximale 16 fois plus forte que la dose de base (1 g/g pour le manganèse et 0,5 g/g pour le bore) correspondrait à nos objectifs.

L'ensemble des doses est obtenu à l'aide de l'équation suivante : $d = ki + 1$.

où : d = dose du bore ou du manganèse

i = intervalle entre deux doses, fixé par la dose maximale.

$k = 0$ $\quad d = 1$

$k = 1$ $\quad d = i + 1$

$k = 2$ $\quad d = 2i + 1$

$k = 3$ $\quad d = 3i + 1$

fixé par un maximum = 16

on a : $3i + 1 = 16$

$i = 5$

Nous aurons donc les doses suivantes :

Pour $k = 0 \rightarrow d1 = 1$

$k = 1 \rightarrow d2 = 6$

$k = 2 \rightarrow d3 = 11$

$k = 3 \rightarrow d4 = 16$

Nous avons ainsi quatre doses croissantes pour chaque oligo-élément étudié (quatre doses pour le bore et pour le manganèse). Afin d'avoir un nombre de degré de liberté valable pour le calcul de variance du facteur bore, du facteur manganèse, de l'intéraction des deux facteurs et de la variance résiduelle (représentative des fluctuations des facteurs autres que bore et manganèse, c'est-à-dire des facteurs non contrôlés). Nous avons choisi de faire quatre répétitions par traitement.

1.2. Permutation et rotation des pots.

Afin de pallier les variations des conditions climatiques et en particulier de l'utilisation de l'énergie incidente, nous avons procédé à des rotations et des permutations des pots.

Pour cela nous avons effectué systématiquement tous les deux jours une rotation d'un quart de tour des pots (un repère tracé sur le pot permet de suivre la rotation) et tous les huit jours une permutation aléatoire des pots (selon : Table of random-permutation HOSES et OAK FORD, 1963) entre les deux emplacements.

A cette occasion, l'ordre des traitements du dispositif est permuté de telle manière que chaque répétition puisse avoir le même temps d'exposition à un endroit donné.

1.3. Expériences effectuées et description des traitements.

Nous donnons les détails concernant les traitements effectués pour les deux expériences.

1.3.1. Première expérience.

Une première expérience a été menée sur deux sols prélevés en France. Un sol brun lessivé sur limon et un sol de rendzine sur calcaire. Les plantes sont cultivées jusqu'à la maturité à raison de deux par pot.

L'expérience est réalisée selon le plan factoriel décrit précédemment (paragraphe 1.1.) et le dispositif du tableau 14.

Dans tous les traitements figurants sur le tableau 14 tous les autres éléments nutritifs sont ajoutés en taux usuels. Les expériences comportent en plus un traitement sans apport d'aucun élément nutritif et un traitement avec apport de tous les éléments nutritifs sauf le bore et le manganèse. Ce qui porte le nombre de traitements à 18. Ce dispositif est appliqué d'une façon identique aux deux types de sols. Le nombre total des pots pour cette expérience sera donc de (18 x4) x 2 = 144 pots.

1.3.2. Deuxième expérience.

Dans une deuxième expérience en fonction des résultats obtenus dans la première, nous avons cherché à compléter et à approfondir notre travail. Le protocole a été modifié en augmentant les doses les plus fortes en bore et en manganèse et en utilisant un troisième sol, il s'agit du sol en provenance de la Basse vallée de l'Euphrate.

Nous avons placé quatre plantes par pot et la culture a été menée jusqu'à la maturité, des prélèvements sont effectués au cours de l'expérience afin de suivre l'évolution des teneurs en oligoéléments et même de certains macro-éléments au cours du cycle du développement de la plante. Ainsi il nous a été possible d'établir un bilan nutritionnel et d'étudier l'effet des différentes doses de bore sur l'absorption, la migration primaire et secondaire et l'accumulation du manganèse dans les différents organes de la plante et vice-versa. A cette fin les prélèvements suivants sont effectués (le choix des stades est guidé par leur importance physiologique dans le cycle de la plante).

- Prélèvement au stade deux de l'échelle de FEEKES (troisième feuille développée, apparition de la quatrième feuille au début du tallage).
- Prélèvement au stade 10.5.1. (début de floraison)
- Prélèvement au stade 11.4 (plante sèche).

Selon le type du sol, les traitements sont les suivants :

- Pour le sol sur limon et le sol de rendzine il s'agit d'un plan pyramidal (C.E.A., 1978), les traitements suivants sont réalisés avec cinq répétitions par traitement.

1 - Blanc (sans ajout d'aucun élément nutritif)
2 - Témoin (avec ajout de tous les éléments nutritifs aux taux usuels)
3 - Traitement 2 plus le bore à la dose d2 (3ppm)
4 - Traitement 2 plus le manganèse à la dose d2 (6 ppm)
5 - Traitement 2 plus le bore à la dose d4 (8 ppm)
6 - Traitement 2 plus le manganèse à la dose d4 (16 ppm)
7 - Traitement 2 plus le bore et le manganèse aux doses d4 (8 ppm + 16 ppm)

Concernant le sol sur alluvion, étant donnée la faible quantité dont nous disposions, nous avons été conduit à nous limiter aux traitements suivants avec trois répétitions (il s'agit d'un plan factoriel à deux facteurs contrôlés du type 2^2) .

- Blanc (sans apport d'aucun élément nutritif).
- Témoin (avec apport de tous les éléments nutritifs aux taux usuels).
- Traitement du témoin plus une dose du bore d4 (8 ppm)
- Traitement du témoin plus une dose du manganèse d4 (16 ppm)
- Traitement du témoin plus une dose en bore et en manganèse d4.(8 ppm + 16 ppm)

Tenant compte du nombre limité de répétitions aucun prélèvement n'a pu être fait au cours du cycle de développement de ces plantes.

- Dans le sol de rendzine et à cause de sa rétention plus importante de bore et de manganèse que nous avons remarqué dans la première expérience les doses des traitements 5 et 6 ont été remplacées par des doses plus fortes (21 fois plus fortes au lieu de 16 fois).

1.3.3. Expérience à partir des grains obtenus lors de la première expérience.

A partir des grains récoltés sur les plantes qui avaient subi les traitements les plus extrêmes au cours de la première expérience, nous avons procédé aux études suivantes :

Rechercher si une carence ou un enrichissement excessif en bore et en manganèse modifie le pouvoir germinatif des grains récoltés et si les plantes obtenues diffèrent des témoins par leur aspect morphologique, leur production de matière sèche et de grains ainsi que leur teneur en bore et manganèse dans les différents organes.

Pour réaliser ces recherches, nous avons cultivé une partie des grains récoltés (l'autre partie étant réservée à l'analyse) en trois répétitions et quatre plantes par pot sans aucun apport d'éléments nutritifs. Cette culture a été conduite à partir des grains suivants :

- Grains dont les parents ont reçu un apport de tous les éléments sauf le bore et le manganèse.
- Grains dont les parents ont reçu un apport de tous les éléments nutritifs plus une dose du manganèse 16 fois plus forte.
- Grains dont les parents ont reçu un apport de tous les éléments nutritifs plus une dose du bore 16 fois plus forte.

Cette expérience a été menée en même temps que la deuxième ce qui ramène le nombre total de pots à :

(7 X 5) (2) + (5 X 3) + (3 X 3) (2) + 4 = 107 pots.

III-2 - POTS UTILISES ET PREPARATION.

Les pots utilisés sont en plastique, de forme cylindro-conique ; ils présentent trois trous d'aération. Leur volume est de 314 cm^3.

La matière plastique a'été choisie pour éviter l'évaporation à travers les parois, problème que l'on rencontre avec les pots en terre.

Les pots sont remplis par 1,6 kg de sol séché à l'air, passé au tamis de 2 mm et homogénéisé à l'aide d'un répartiteur. Au fond de chaque pot nous avons déposé un filtre en tulle au-dessus duquel nous avons mis 200 g de sable inerte, préalablement trempé dans l'acide chlorhydrique 10% pendant 24 heures puis lavé abondamment avec l'eau distillée; l'élimination de l'acide chlorhydrique est testée par la réaction au nitrate d'argent jusqu'à la neutralité.

III-3 - GERMINATION ET TRANSPLANTATION.

Les grains après avoir été calibrés au tamis de 3,2 mm sont désinfectés pendant trois minutes par trempage dans une solution de 40 g/L d'hypochlorite de calcium à 2% de chlore, ils sont ensuite rin-

cés à l'eau distillée plusieurs fois (l'analyse chimique montre que le traitement n'augmente pas la quantité de chlore, les grains traités n'étant pas plus riches que les grains non traités).

Les grains subissent un prétrempage de six heures dans l'eau distillée, ils sont ensuite disposés, sillon ventral vers le bas, sur deux rondelles de papier filtre sans cendre dans des boîtes de Petri en plastique de 90 mm contenant 5 ml d'eau distillée.

Les boîtes de Petri sont placées à l'obscurité à 20 $\pm$ 1°C. La germination a été voisine de 98%, seules les jeunes plantes présentant des racines seminales normales et un coléoptile de 13 à 20 mm. ont été repiquées.

La transplantation a lieu dans le sol préalablement humecté à une profondeur de 2,5 cm à l'aide d'un plantoir en bois. Toutes les précautions sont prises pour ne pas abimer les plantules et surtout leur coléoptile .

III-4 - ARROSAGE.

Les pots sont arrosés avec de l'eau permutée. Nous avons évité tout drainage susceptible d'entraîner des éléments nutritifs;pour y parvenir les points de PF à retenir sont déterminés par des essais préliminaires. Nous avons choisi de maintenir le PF dans les sols entre 2,5 et 3 (Voir tableau 15).

Les points de PF permettent de calculer les quantités d'eau à ajouter à chaque sol pour que l'humidité soit comprise dans les limites choisies. Au cours des expériences les arrosages sont réalisés de telle manière que le PF atteigne 2,5 (Tableau 16) ce qui correspond en général à la capacité au champ.

On en déduit les poids totaux des pots (pot vide + sol + sable + eau à ajouter pour ne pas dépasser le PF 2,5 et ne pas descendre au-dessous de PF 3) (Voir tableau 16), une fois ce calcul établi les arrosages se font à poids constant.

Les pots sont régulièrement pesés et on ajoute à chaque arrosage les quantités d'eau nécessaires pour obtenir le PF 2,5.

Les arrosages ont été effectués en dehors des périodes chaudes de la journée, c'est-à-dire avant 10 h et après 16 h.

Pour donner le temps aux agrégats de retenir l'eau sans infiltration rapide, le premier arrosage a été réalisé par plusieurs arrosages progressifs légers.

TABLEAU 15 - TENEUR EN EAU EN % DU SOL SEC DANS LES DIFFERENTS TYPES DE SOL.

Teneur en Eau / Type de sol	Sol prélevé lors du remplissage des pots.	PF 3,0	PF 2,5
Sol brun lessivé sur limon	20,23	21,02	27,62
Sol rendzine sur calcaire	26,77	30,41	35,35
Sol peu évolué sur alluvion	22,46	25,12	30,45

TABLEAU 16 - QUANTITES D'EAU BIDISTILLEE D'ARROSAGE NECESSAIRE A L'OBTENTION DE PF 2,5 et 3,0

PF Type du sol	2,5		3		Poids d'un pot avant l'arrosage Kg.
	Quantité d'eau à apporter (ml)	Poids total du pot (gr)	Quantité d'eau à apporter (ml).	Poids total du pot (gr)	
Sol brun lessivé sur limon	118	2018	12,6	1912,6	1,900
Sol rendzine sur calcaire	137,3	2037,3	96	1996	1,900
Sol peu évolué sur alluvion	127,8	2027,8	85,3	1985,3	1,900

Ainsi par le maintien de poids de pots stable on peut maintenir l'humidité dans les pots au niveau correspondant à l'humidité au champ (pF = 2,5).

III-5 - COMPOSITION CHIMIQUE DES SOLUTIONS FERTILISANTES APPORTEES A LA CULTURE :

Nous avons fertilisé les pots à l'aide de solutions nutritives inspirées de HEWITT 1952. Les sels minéraux sont des produits suprapur (Merck) le pH des solutions est ajusté à 5,2 avec la soude.

Les taux et les formes, sous lesquels les éléments sont apportés, sont consignés dans le tableau 17.

TABLEAU 17 - ELEMENTS NUTRITIFS APPORTES.

Elément	Dose apportée mg/Kg de sol.	Forme
N	125	KNO_3, $Ca(NO_3)_2$, 4 H_2O et $NH_4H_2PO_4$
K	116,2	KNO_3 et K_2SO_4
P	32	$NH_4H_2PO_4$
Ca	63,4	$Ca(NO_3)_2$, $4H_2O$
Mg	30,2	$MgSO_4$, 7 H_2O
B	0,50	H_3BO_3
Mn	0,50	$MnCl_2$, 4 H_2O
Cu	0,33	$CuSO_4$, $7H_2O$
Zn	0,25	$ZnSO_4$, $7H_2O$
Fe	1,52	$FeSO_4$, $7H_2O$ + EDTA Na_2
Mo	0,11	$MO_7O_{24}(NH_4)_6$

Une première solution ne contenant que la moitié de l'azote et du potassium nécessaire est apportée quatre jours après le repiquage.

La deuxième moitié de l'azote et du potassium est apportée trois semaines plus tard. L'application des solutions fertilisantes a été effectuée à l'aide d'une seringue pour une meilleure distribution sur l'ensemble de la surface du sol des pots.

CHAPITRE IV

METHODES ET TECHNIQUES ANALYTIQUES

IV 1 - PREPARATION ET MISE EN SOLUTION DES ECHANTILLONS.

IV. 1.1. Echantillons de plantes.

Les plantes prélevées de chaque répétition sont divisées en différents organes (grains, limbes, tiges, gaines, racines et noeuds), ces organes sont séparément nettoyés avec un pinceau en soie mouillé à l'eau bipermutée, pour éliminer la poussière éventuellement déposée à la surface des organes. Nous n'avons utilisé ni détergent ni acide chlorhydrique dilué. En effet dans des études multiples et récentes sur l'effet de rinçage des échantillons à l'acide chlorhydrique et l'eau (technique couramment utilisée jusqu'à maintenant)sur les teneurs en 11 éléments WALLACE et al.(1980 et 1982)ont conclu que cette technique de rinçage peut entraîner un déplacement des éléments présents à l'intérieur des feuilles ainsi que des éléments de polution en surface. KOWALENKO (1984) a montré l'importance de laver à l'eau les feuilles aussi bien pour les éléments majeurs que pour les éléments traces.

Les échantillons sont séchés directement après prélévement et nettoyage. (ABo.1980), à 70°C pendant 48^h dans une étuve destinée aux travaux sur ces éléments traces refroidis 30 mn au dessicateur pesés avec précision pour avoir le poids de la matière sèche récoltée. Les échantillons sont ensuite finement broyés (à 200µ) et stockés dans des sacs en plastique pour la mise en solution et l'analyse.

Nous avons jugé nécessaire d'analyser les racines, même si

leur récolte s'avère un travail long et délicat; nous avons procédé de la façon suivante . Le sol imprégnant les racines a été tamisé sur tamis de 2 mm. Les racines sont ensuite lavées à l'eau bidistillée plusieurs fois sans les laisser émerger dans l'eau. Les racines lavées sont séchées directement à l'étuve et broyées comme pour les autres organes.

Les échantillons des différents organes hétérogènes, comme tout matériel biologique, sont homogéneisés au mieux, séchés de nouveau comme ci-dessus et un prélèvement de 0,250 à 1,00 g selon les organes a été pesé dans une capsule en platine pour être calciné dans un mouffle en silice. Nous avons cherché à suivre la procédure de calcination et de mise en solution à la fois efficace et simple pour réduire au maximum toute contamination (ABo, 1980). Ainsi nous avons suivi la méthode par voie sèche préconisée par le C.I.I. : Les échantillons mis en capsule sont soumis à une augmentation progressive de la température pour éviter qu'une oxydation trop rapide entraîne une surchauffe locale amorçant une fusion par point avec enrobage de particules de carbone :100°C durant 45 mn., 200°C pendant une heure, 250°C également pendant une heure et 450°C pendant quatre heures; on doit obtenir ainsi des résidus minéraux blancs , signe de destruction de toute la matière organique et d'oxydation du carbone. Cette calcination avec les matériels appropriés utilisés est sans danger de contamination puisque l'oxygène est le seul réactif dans cette procédure.

Un inconvénient de la calcination est la volatilisation de certains éléments (le bore dans ce travail) mais les auteurs admettent que entre 450 et 500°C le risque de volatilisation est minimal (COTTENIE 1981), d'autres auteurs retiennent 550°C pour le dosage du bore (GESTRING, SOLTANPOUR 1981; WOLF , 1971). Pour plus de précaution nous avons fait un essai préliminaire en calcinant 10 échantillons (0,5 g) en présence de 2 ml d'acétate de calcium 10% à 450°C. Cet essai n'a pas montré une différence significative entre la teneur en bore dans les échantillons sans et avec ajout d'acétate de Ca (0,95 ppm contre 0,90 pmm respectivement sur la moyenne de 10 échantillons).

Les échantillons calcinés sont refroidis dans un dessicateur sous vide pendant 20 minutes. Puis pour la mise en solution les cendres toujours en capsule en platine sont reprises avec 1 ml d'acide nitrique 13N "suprapur" (HNO_3 peut être obtenu comme un réactif très pur par

rapport aux autres acides utilisés Hcl, H_2SO_4, $HClO_4$ ...), et 4 ml d'eau bipermutée, les capsules sont bien agitées puis abandonnées 16 heures. Les échantillons sont amenés à sec sur une plaque chauffante à 90°C sous une hotte à flux laminaire dans une pièce réservée à ce type de travail.

Les résidus sont repris avec l'acide nitrique dilué et l'eau bipermutée puis filtrés sur filtre sans cendre, les filtres sont incinérés à 450° pendant 30 mn, repris à l'acide nitrique diluée puis filtrés. La concentration du milieu final en acide est de 2 %. Pour le dosage du bore les solutions sont mises dans des tubes en plastique conseillés par leur absence de bore.

1.2. Echantillons de sols.

L'intérêt croissant des oligoéléments dans les sols stimule l'obtention des résultats justes et précis ce qui amène à prendre des précautions préalables à l'analyse, concernant l'homogénéité et la représentativité de l'échantillon destiné aux différents dosages. Cet échantillon séché à l'air et tamisé à 2 mm a été broyé à 200 µ dans un broyeur agathe, pour la contamination (HAMILTON 1980); des tamisages rapprochés et successifs sont nécessaires pour l'homogénéité de broyage et pour prévenir la perte sous forme de poussière fine.
L'attaque et la mise en solution varient selon le but de l'analyse. En plus de l'analyse des sols bruts, à la fin de l'essai le bore et le manganèse sont dosés dans les sols de chaque traitement. Le bore est extrait à l'eau bouillante (voir 1-2-4) et le manganèse est extrait par la méthode (1-2-2) ci-dessous.

1.2.1. Méthode d'attaque et de mise en solution pour le dosage des oligoéléments totaux.

Après homogénéisation 0,5 gr du sol brut broyé à 200 µ et séché dans une capsule platine, additionné de quelques gouttes d'eau bipermutée 10 ml d'acide flurohydrique (HF) concentré (D 1,16) et 5 ml d'acide perchlorique ($HClO_4$) concentrée (10 N).

Le protocole est le suivant :

- Couvrir avec une planche en téflon.
- Laisser en contact à froid pendant 16 heures pour décomposer les silicates.

- Chauffer sur plaque chauffante à 60°C pendant 8 heures.
- Mener à sec jusqu'à élimination des fumées blanches (5 heures environ).
- Reprendre avec 5 ml d'acide fluorhydrique concentré et laisser en contact à froid une heure.
- Mener à sec jusqu'à l'élimination des fumées blanches.
- Reprendre avec 5 ml d'Hcl 50%.
- Mener à sec sans calciner (montée progressive de la température sans dépasser 150°C.)
- Ajouter de nouveau 5 ml d'Hcl 50% + 10 ml d'eau biéchangée bouillante.
- Filtrer sur filtre sans cendre en fioles de 50 ml en rinçant avec l'eau biéchangée tiède la capsule et le filtre.
- Laisser refroidir et jauger à 50 ml, le milieu final est à 5 % d'acide chlorhydrique.

1.2.2. Méthode de mise en solution pour le dosage des oligoéléments extractibles.

Plusieurs méthodes d'extraction des oligoéléments sont utilisées, beaucoup d'auteurs appellent les éléments extraits par ces méthodes des éléments assimilables , en fait aucun réactif chimique, jusqu'à maintenant ne réagit dans le sol comme les racines réagissent pour absorber les éléments nutritifs; l'absorption par les racines est un phénomène très complexe dans lequel plusieurs facteurs interviennent, biologique,chimique,physique; il est ainsi difficile de comparer, l'extraction par un réactif chimique et l'absorption par les racines. Même si l'on s'efforce de trouver des réactifs se rapprochant de ce qui se passe dans la réalité,on ne peut les utiliser qu'à titre indicatif au sens large du terme et dans des cas bien précis.

Il reste encore beaucoup à faire pour tester les éléments assimiliables par les plantes. A titre méthodologique et pour comparer nos différents

sols, nous avons retenu une extraction à l'acide chlorhydrique 0,1 N pour le dosage des oligoéléments extractibles.

La méthode est la suivante :

- peser 10 grs du sol broyé à 200 µ et séché à l'air dans un flacon en polypropylène. Mesurer le pH du sol à l'eau et ajouter de l'acide chlorhydrique au sol rendzine et au sol sur alluvion, riche en calcaire, pour neutraliser le calcaire et ramener le pH à 7.
- Ajouter 100 ml de l'acide chlorhydrique 0,1 N "supra pur" et laisser en contact 16 heures puis agiter quatre heures en agitateur rotatif.
- Laisser décanter et filtrer dans une fiole jaugée de 100 ml. L'extrait est utilisé pour le dosage des oligoéléments suivants : cuivre, manganèse, zinc et fer.

1.2.3. Méthode d'extraction du bore total.

Le bore total est peu indicatif pour le bore absorbé par la plante; à titre de comparaison entre les différents types de sols nous avons fait le dosage du bore total en spectrométrie d'émission atomique avec plasma (ICP). La méthode d'extraction suivie est celle de fusion avec la soude, elle a le même principe que celle de WEAR (1965) modifiée par BINGHAM (1982), l'utilisation de l'ICP a facilité et raccourci la méthode comme suit : Fusionner 0,1 g du sol sec à l'air et broyer à 100 µM avec 1,5 g de NaoH dans une capsule en argent (à cause de la solubilité limitée du bore contenu dans les minéraux du sol il est indispensable de décomposer le sol par le NaoH).

Faire un premier chauffage sur un minéralisateur rapide jusqu'à ce que la soude fonde. Laisser la fusion se faire à 900°C pendant 3 minutes (la

soude attaque le sol et solubilise le bore).
Laisser refroidir et ajouter 15 ml d'acide sulfurique 2,5 N pour neutraliser la soude et mettre en milieu légèrement acide.
Mettre en ultra-son pendant 10 minutes. Dissoudre le résidu qui reste par un agitateur et transvaser dans un flacon de 50 ml en plastique. Doser en spectrométrie d'émission atomique avec atomisation dans un plasma induit (S.E.A - I C P).

1.2.4. Méthode d'extraction du bore à l'eau bouillante.

L'extraction à l'eau reste la procédure la plus employée.
Le bore peut s'accumuler dans les sols (particulièrement dans les zones arides) et atteindre des concentrations dans la solution du sol pouvant limiter la production végétale; il serait intéressant de déterminer cette concentration.
Dans la procédure d'extraction il est important d'exclure tout matériel en cristal ou en pyrex de l'utilisation, le matériel en quartz ou en Nalgène est conseillé.
La méthode consiste à peser 20 g du sol sec à l'air et broyé à 200 µM, dans un Erlèn-Mayer en quartz puis ajouter 50 ml d'eau biéchangée et distillée en distillateur en quartz,cette eau est ensuite bouillie pendant 10 minutes pour chasser le gaz carbonique.
Chaque Erlèn est munit d'un réfrigérant en quartz, puis les porter à ébullition pendant 5 mn.On laisse refroidir, décanter avant de filtrer sur filtre sans cendre dans des flacons de 50 ml.

Dans les sols organiques et si le dosage s'effectue en colorimétrie, on ajoute 0,3 g de charbon végétal actif pour décolorer l'extrait.

IV. 2 - TECHNIQUE D'ANALYSE ET APPLICATION AUX ELEMENTS ETUDIES.

Pour l'analyse des plantes et des sols, nous avons fait appel aux techniques physico-chimiques d'analyse. Ces techniques nous ont permis de multiplier les déterminations des éléments dosés.

Nous avons dosé les éléments suivants :

- ELEMENTS MAJEURS : Parmi les éléments majeurs, nous avons étudié les éléments qui semblent les plus en rapport avec les oligoéléments qui font l'objet de ce travail : le potassium, le calcium, le magnésium et le phosphore.

- OLIGOELEMENTS : Bien que nous ayons centré notre travail sur le bore et le manganèse, il était important d'étudier les effets de ces deux oligoéléments avec le cuivre, le fer et le zinc qui sont d'importance évidente en agriculture, en Syrie comme ailleurs.

Les dosages de ces différents éléments sont effectués par les méthodes suivantes :

IV.2.1. Spectrométrie d'absorption atomique (S.A.A.).

Il s'agit d'une méthode instrumentale rapide, d'exécution relativement facile. Nous rappelons ici, brièvement, les principes de base de S.A.A.

2.1.1. Généralités et principe.

L'absorption atomique est une propriété physico-chimique spécifique de chacun des éléments ; son principe fondamental est la loi de KIRCHOFF,(1859) *"un atome ne peut absorber que les radiations qu'il est capable d'émettre"*. Ce n'est qu'après un siècle (en 1955) que WALSH et ALKEMADE posèrent le principe de la détermination d'un élément chimique à l'aide de son spectre d'absorption atomique.

Lorsqu'un atome excité passe d'un niveau d'énergie E_h à un niveau inférieur E_b, il émet une radiation spectrale de fréquence ν, la variation d'énergie $E_h - E_b$ est retrouvée sous forme d'un quantum d'énergie rayonnante h_ν.

$h\nu = E_h - E_b$

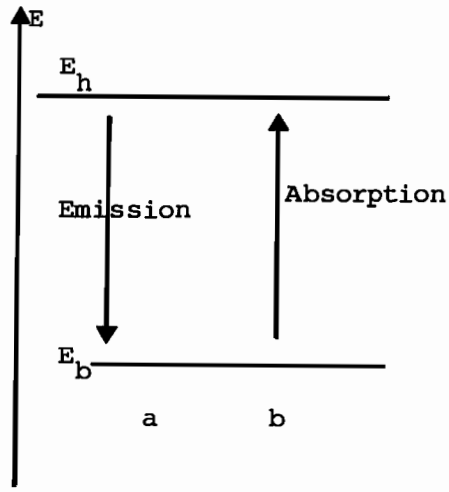


Figure 13 - Emission-absorption.

a : émission d'une raie de fréquence $\nu = \frac{E_h - E_b}{h}$ (loi de Bohr)

b : absorption de la même raie

h : constante de Planck.

2.1.2. Spectrométrie d'absorption atomique avec flamme (S.A.A.F) et application aux dosages de (Ca, Mg, K, Zn, Mn).

Cette méthode est utilisée d'une façon extensive pour le dosage des éléments minéraux majeurs et certains oligoéléments, nous avons dosé les éléments suivants : Ca, Mg, Zn, Mn en S.A.A.F. et le K en spectrométrie d'émission avec flamme; le cu n'ayant pas pu être dosé en S.A.A.F., à cause de ses faibles concentrations dans les plantes et les sols étudiés, il a été dosé en S.A.A. par voie électrothermique. L'appareil utilisé est un spectrométre mono-faisceau,mono-chromateur classique de type Perkin- Elmer modèle 303.

Pour le dosage du calcium et du magnésium nous avons ajouté du lanthane à 1%; pour corriger les interactions chimiques dûes au silicium et à l'aluminium qui forment avec ces deux éléments des combinaisons stables réfractaires à la température d'atomisation. Le lanthaneajouté forme avec les éléments interférants des combinaisons plus stables qu'avec l'élément dosé. A titre d'exemple nous donnons les courbes d'étalonnage obtenues par cette méthode pour le

dosage du zinc (fig. 14). Nous résumons dans le tableau 18 les conditions opératoires et les propriétés d'analyse.

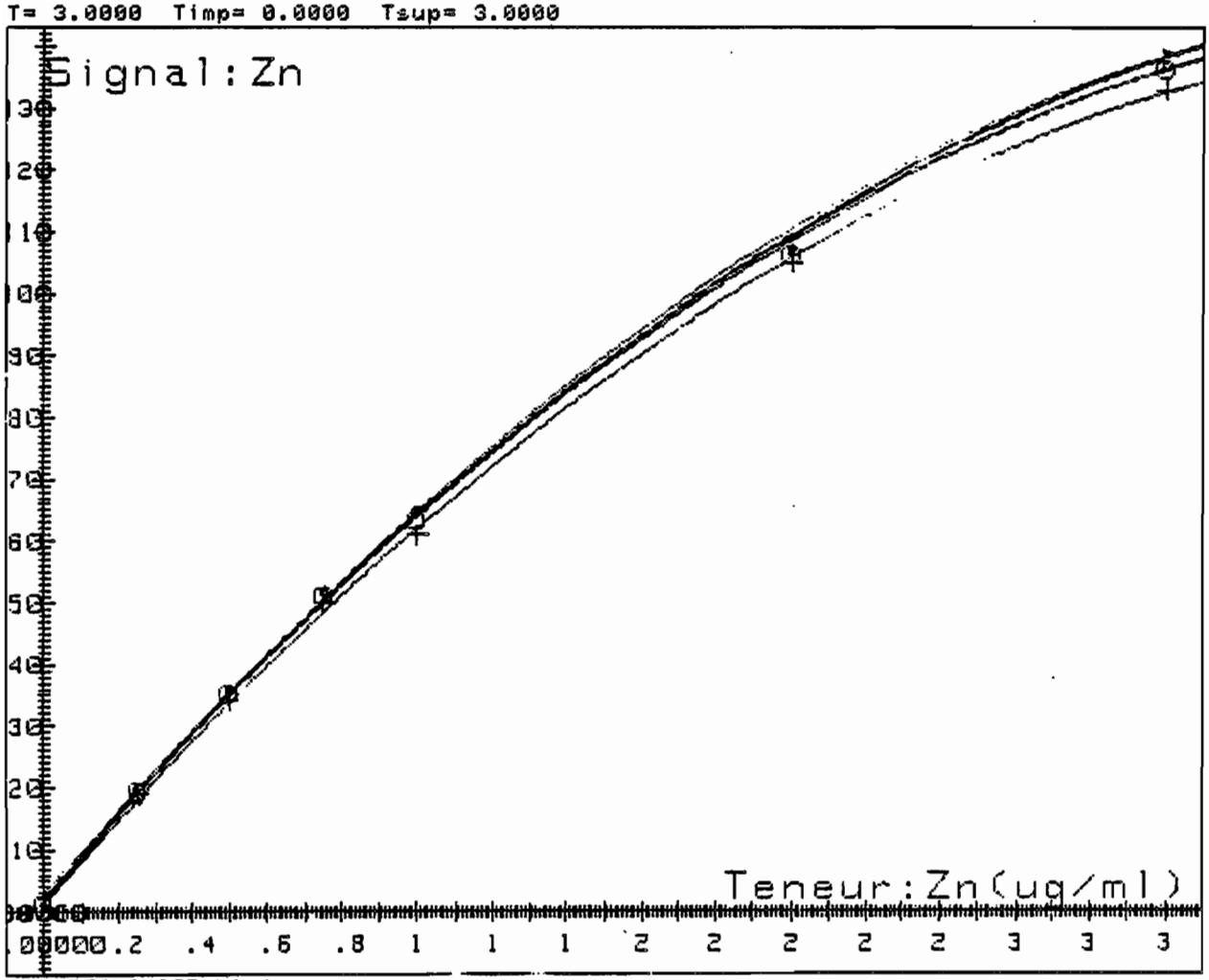
2.1.3. Spectrométrie d'absorption atomique par voie électrothermique et application au dosage de (Cu,Mn).

Si les flammes restent le moyen le plus fréquemment utilisé comme source d'atomisation, les systèmes d'atomisation par voie électro-thermique ont connu un développement important lié à certaines limitations des flammes; c'est aussi la technique d'absorption atomique qui s'est la plus développée (PINTA et al., 1979).

```
Dossier:BLE2SY<------>Date:16/11/83
*** ETALONAGE N° 7 : Valeur des étalons***

   * N°  * Teneur:Zn(* Signal:Zn *
   *  1  *   0.0000  *    1.0    *
   *  2  *    .2500  *   20.0    *
   *  3  *    .5000  *   36.0    *
   *  4  *    .7500  *   52.0    *
   *  5  *   1.0000  *   65.0    *
   *  6  *   2.0000  *  107.0    *
   *  7  *   3.0000  *  137.0    *
***Etalonnage numero  7  Determination des coefficients de l'ajustement :Y = A(0
) + A(1)*C + A(2)*C^2 + A(3)*C^3 +--------- + A(n)*C^n
Ajustement polynomial quelqonque : Y = (Hpic)
R^2= Coefficient de détermination
REGRESSION AVEC  1  DEGRE D'AJUSTEMENT
Y = 12.0679 + 44.4700 *C
***  R^2 =  .9742
REGRESSION AVEC  2  DEGRES D'AJUSTEMENTS
Y = 2.4118 + 70.7971 *C +-8.7301 *C^ 2
***  R^2 =  .9993

T= 3.0000  Timp= 0.0000  Tsup= 3.0000
```




```
+ : ETALONAGE N° 1
o : ETALONAGE N° 2
x : ETALONAGE N° 3
> : ETALONAGE N° 4
^ : ETALONAGE N° 5
< : ETALONAGE N° 6
c : ETALONAGE N° 7
```

Figure 14 - COURBE D'ETALONNAGE DE ZINC.

TABLEAU 18 - CONDITIONS ANALYTIQUES UTILISEES POUR LE DOSAGE de Ca, Mg, K, en absorption atomique avec flamme (Perkin-Elmer 303).

Elément	Raie mm	Flamme	Fente mm	Réseau	Brûleur	Hauteur Brûleur	Gaz	Limite de détection µg/ml	Gamme µg/ml	Sensibilité µg/ml/1 % absorption
Ca	422,7	faiblement Réd *	3,0	visible	grand 3 fentes	10	air-C_2H_2	0,01	0 - 2 - 4 - 6 - 8	0,05
Mg	285,2	Réd *	3,0	ultra-visible	petit 1 fente	9	air-C_2H_2	0,003	0 - 0,2 - 0,5 - 0,75 - 1,0 - 1,5	0,01
K	766,5	Oxy **	4,0	visible	petit 1 fente	9	air-C_2H_2	0,01	0 - 2,5 - 5 - 7,5 - 10	0,01
Mn	279,8	Oxy **	3,0	ultra-visible	grand 1 fente	10	air C_2 H_2	0,005	0-0,25-0,5-1-2-5 10-15	0,10
Zn	213,8	Oxy **	4,0	"	"	11	air C_2 H_2	0,002	0-0,25-0,5-0,75 1-2-3-5	0,025

* Flamme réductrice avec excès de combustible ** Flamme oxydatrice avec excès de comburant.

c'est une technique de très grande sensibilité offrant la possibilité de travailler sur de très petites quantités d'échantillons (Abo,1980)

- Appareillage :

Nous avons utilisé un spectromètre d'absorption atomique mono-faisceau mono-canal (perkin-Elmer, type 400) où le système nébuliseur-brûleur est remplacé par un four en graphite dans lequel l'atomisation s'effectue; il est chauffé par effet joule; le four utilisé (perkin-elmers HGA500) est doté d'un système de commande informatisé qui permet de contrôler les paramètres thermiques (température, durée, montée, refroidissement, débit de gaz) pendant les différents cycles (séchage, décomposition,atomisation).

L'appareil est muni d'un système de correction de fond permettant de corriger les absorptions non spécifiques, la source des photons est une lampe à cathode creuse qui a l'avantage d'émettre un flux lumineux d'intensité constante dans le temps.

La radiation sélectionnée est captée par un récepteur de mesure qui délivre un pic d'absorbance. L'A.A. étant une méthode comparative,la concentration réelle dans l'échantillon est obtenue par rapport à une gamme étalon établie à partir d'une solution de concentration connue en élément dosé.

Les oligoéléments qui sont dosés par cette méthode sont le cuivre dans les sols et les plantes pour tous les essais, le manganèse dans les plantes pour le premier essai en comparaison avec la flamme qui s'avère donner des résultats semblables et donc dosé par la flamme pour le deuxième essai, le manganèse et le zinc dans l'extrait du sol à Hcl 0,1 N.

- Procèdure d'analyse:

Une prise d'essai de 20 µl est introduite automatiquement par un auto échantillonneur dans le four. L'analyse est faite dans un environnement inerte d'argon pour éviter la formation d'oxyde et réduire les combustions aux températures élevées. La programmation du chauffage comporte les cycles suivants :

- cycle de séchage : au cours de ce cycle, le solvant est éliminé à une température voisine de 100°C (évaporation qui ne doit pas être

trop rapide);

- cycle de décomposition : pendant ce cycle, le sel est dissocié et la matrice est détruite thermiquement en atmosphère inerte ;
- cycle d'atomisation : ce cycle est destiné à volatiliser et décomposer en atome l'élément à doser par une montée en température rapide ayant pour effet de produire le maximum d'atomes neutres qui absorbent le faisceau cathodique ; le signal est enregistré par le récepteur de mesure.

Enfin, un nettoyage à haute température est fait pour éviter l'effet de mémoire avant de refroidir l'élément chauffant (PINTA, 1978).

Le deuxième cycle est le plus délicat car il peut donner lieu à des pertes s'il est conduit à température trop élevée, en particulier, en présence de chlorure, de composés organiques ou de métaux volatils.

2.1.4 - Problèmes particuliers liés à l'analyse des plantes et des sols.

La bibliographie propose de nombreux remèdes pour la correction des perturbations. Il s'agit de compensations empiriques d'effets observés dans un milieu donné dans des conditions opératoires déterminées.

Ces procédés peuvent permettre d'obtenir des analyses correctes, mais il faut savoir que, par nature, ils ne sont, généralement, efficaces que dans le cas considéré. Ces méthodes particulières tiennent compte des propriétés physique et chimique des solutions à analyser : il est donc nécessaire de connaître les perturbations qui peuvent intervenir durant l'analyse.

2.1.4.1 - Absorption non spécifique.

La mesure d'absorption enregistrée doit être spécifique de l'élément dosé. Dans les atomiseurs électrothermiques il n'est pas rare que l'absorption spécifique ne représente qu'une partie de l'absorption totale, ceci est important dans le cas de nos milieux très complexes qui conduisent à des interférences ou effet de matrice sur tel élément dosé.

La partie non spécifique de l'absorption se compose de :

- une absorption parasite résultant de particules non dissociées et conduisant à une majoration de l'absorption dans tout le spectre; ce type d'absorption est détecté par des pics anormalement forts.
- une absorption moléculaire limitée dans le spectre et résultant de composés stables dans les conditions d'atomisation données (ADAMS et al., 1975, CULVER et SURLES, 1975). Elle est liée à la composition de la matrice à analyser et aux différentes réactions chimiques qui conduisent à la formation des corps chimiques difficiles à dissocier.

Ces deux types d'absorptions non spécifiques, parfois difficile à distinguer dans la pratique, sont certainement d'importants facteurs d'erreur dans l'analyse.

Il nous a paru possible de corriger et de maîtriser convenablement l'erreur qui peut être introduite par cette absorption, en utilisant un correcteur de fond : il s'agit d'une lampe à hydrogène au deutérium destinée à mesurer les absorptions non spécifiques pour les éléments dont les raies sont situées dans le domaine de longueur d'onde de cette lampe, autrement dit 190 à 325 nm.

Par un montage électronique approprié, le signal dû à l'élément est mesuré, exempt de toute absorption non spécifique.

Nous avons remarqué que lorsque le four en graphite utlisé est détérioré, après chaque atomisation, il apparaît un signal négatif qui ne doit pas être confondu avec les autres interférences mais il peut servir d'indicateur de dégradation de four (SHERFINSKI. 1975).

Nous avons étudié les problèmes d'absorptions non spécifiques et d'interférences ; cette étude a été faite à l'aide des trois méthodes suivantes (PINTA et RIANDEY, 1975).

- mesure à la longueur d'onde de l'élément à partir d'une matrice synthétique mais exempte de l'élément à doser,
- mesure de la densité optique corrigée à l'aide d'une lampe au deutérium.
- mesure de l'absorption non spécifique à une longueur d'onde voisine de celle de l'élément.

2.1.4.2. Effet de la matrice.

Les effets de matrice sont des perturbations causées par les éléments existant dans l'échantillon ainsi que ceux apportés par le traitement chimique de l'échantillon avant le dosage.

Dans le cas de nos analyses, nous avons étudié l'influence du milieu nitrique (à 1 % pour les solutions nutritives et à 2 % pour les solutions des plantes) résultant de la mise en solution et de la présence des éléments tels que Fe, K, Ca.

2.1.4.3. Sensibilités obtenues.

La sensibilité que l'on peut atteindre en absorption atomique "en four" est trés grande, sans séparation ni enrichissement chimique (la précision atteint facilement 10 % (PINTA et al., 1979)) L'analyse se fait sur la quantité absolue d'éléments présents dans le four, indépendamment de sa concentration dans la solution puisque le solvant est évaporé au cours du séchage. En prenant toutes les précautions possibles pour éviter les contaminations et les absorptions parasites, les sensibilités obtenues sont très grandes ; elles sont présentées dans le tableau 19.

TABLEAU 19 DONNEES ANALYTIQUES SUR LE DOSAGE EN ATOMISATION ELECTROTHERMIQUE.

	Limite de détection	Sensibilité ng/ml pour 1 % absorption (*)
Cu	2×10^{-11} g	3
Mn	$0,2 \times 10^{-12}$ g	0,2
Zn	$0,5 \times 10^{-12}$ g	0,1

(*) Sensibilité exprimée en concentration de l'élément (µg/ml) donnant une absorption de 1 %.

2.1.4.4. Contamination.

La détermination des oligo-éléments par l'atomisation électrothermique se fait sur des prises d'essai "microchimiques" (10 µl ou 0,1 mg), si bien que les quantités absolues d'éléments dosés sont de l'ordre du picogramme (10^{-12} g). Ces teneurs contaminent fréquemment l'atmosphère de laboratoire, ce qui induit des mesures aberrantes par excès ; ceci étant valable surtout pour le zinc et le cuivre ainsi que pour d'autres éléments.

Pour y remédier, PINTA et al. (1979) proposent certains principes dont nous avons tenu compte :

- simplification des opérations chimiques,
- utilisation de matériel de grande propreté,
- utilisation des réactifs spécialement purifiés,
- limitation des quantités d'acides utilisés.
- préparation des solutions d'analyse, ainsi que l'installation de spectromètre en salle dépoussiérée (voir Abo 1980).
- exécution d'essai "blanc" comprenant toutes les opérations analytiques.

2.1.5. Recherche du programme thermique pour le dosage de chaque élément.

La sensibilité du dosage est fonction de la production d'atomes neutres présents dans l'échantillon et dépend des conditions thermiques d'atomisation.

La recherche du programme de chauffage dépend de chaque cas; elle est entreprise pour aboutir à une atomisation de l'élément à doser de façon aussi spécifique que possible, donc non perturbée par des absorptions non spécifiques, et, par là même, à la précision et à l'exactitude optimales de l'analyse.

Au cours de l'étape de décomposition, nous cherchons aussi à éliminer les constituants volatils de la matrice sans volatiliser l'analyte.
Nous avons étudié les courbes de programmation thermique afin de déterminer les températures et le temps convenables de décomposition et d'ato-

misation à partir desquels l'absorbance commence à décroître.

Le séchage est pratiquement identique pour tous les essais : 100°C pendant 20 à 30 secondes pour 20 µl.

Dans un premier temps, on étudie l'influence de la température de décomposition sur l'absorbance, la température d'atomisation étant maintenue constante, à une valeur arbitrairement choisie à partir de données connues par la bibliographie, et, dans un deuxième temps,pour déterminer la température optimale d'atomisation on procède de la même façon, en fixant la température de décomposition trouvée précédemment en augmentant régulièrement la température.

Les programmes retenus pour les éléments dosés sont donnés dans le tableau20. A titre d'exemple nous donnons respectivement dans les figures 15 et 16 les courbes de détermination du programme thermique et d'étalonnage pour le cuivre.

Tableau 20 Programmes thermiques retenus pour le dosage du cu, du Mn et du Zn dans les sols.

	Cycle	Température (°C)	Temps (S.)	Débit d'Argon ml/mn.
Cu	Séchage	100	30	300
	Décomposition	800	30	300
	Atomisation	2450	7	50
	Refroidissement	20	5	50
Mn	Séchage	100	30	300
	Décomposition	(1000	25	300
		(1000	25	300
	Atomisation	2500	6	50
	Refroidissement	20	5	50
Zn	Séchage	100	30	300
	Décomposition	800	30	300
	Atomisation	1900	7	50
	Refroidissement	20	5	50

Tableau 21 Programmes thermiques pour le dosage du Cu. et du Mn. dans les plantes

	Cycle	Température (°C)	Temps (S.)	Débit d'Argon ml/mn.
Cu	Séchage	100	30	300
	Décomposition	1000	30	300
	Atomisation	2500	6	30
	Refroidissement	20	5	30
Mn	Séchage	100	40	300
	Décomposition	(1100	25	300
		(1100	6	300
	Atomisation	2400	6	50
	Refroidissement	20	5	50

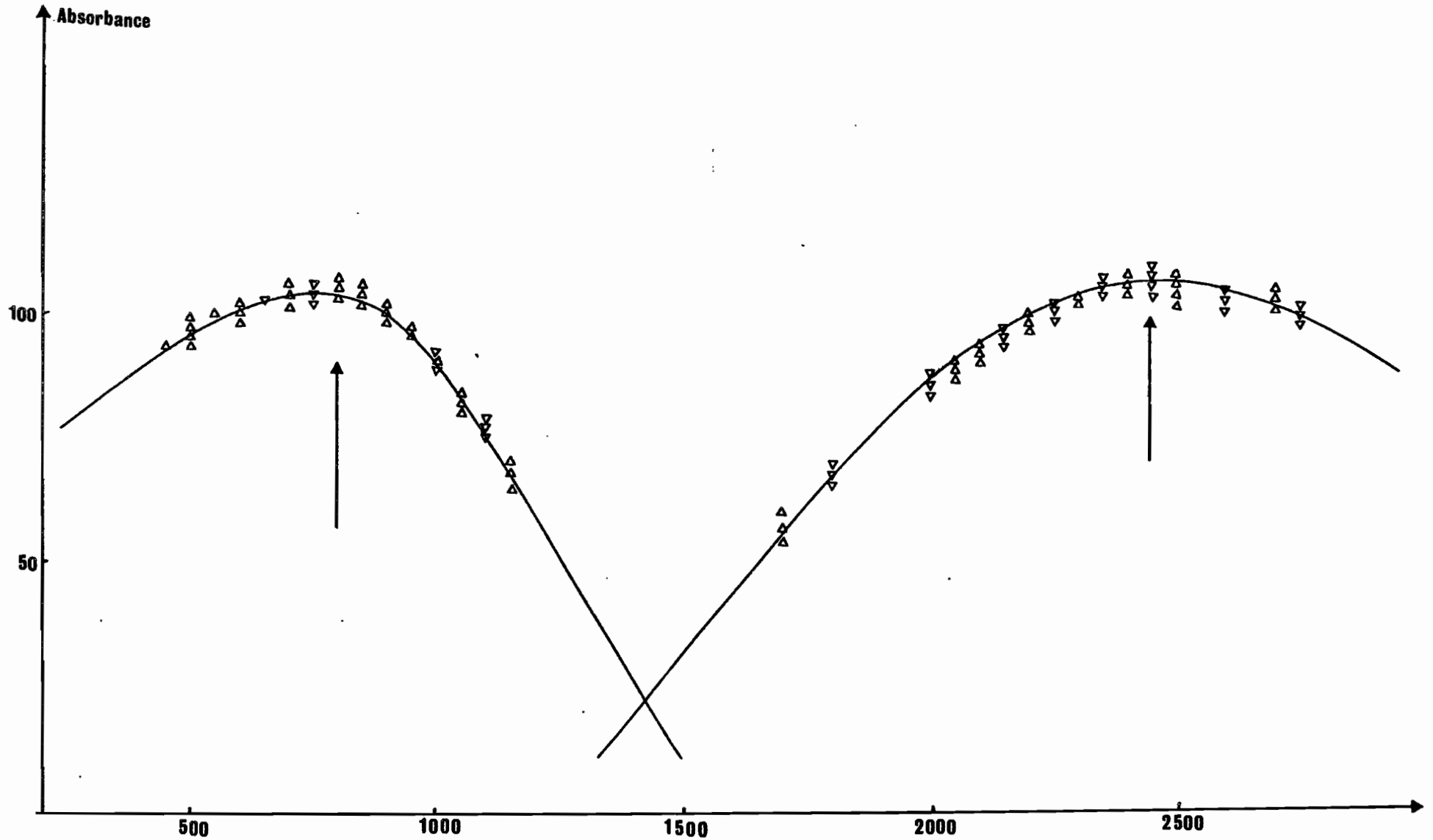


Fig. 15 - Détermination du programme thermique pour le dosage du cuivre dans le sol (Four HGA 500)

*** Elément dosé : Cu
*** Identification : FOUAD
*** Date : 22/12/82

ETALONAGE NUMERO 2.0000 DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE L'AJUSTEMENT

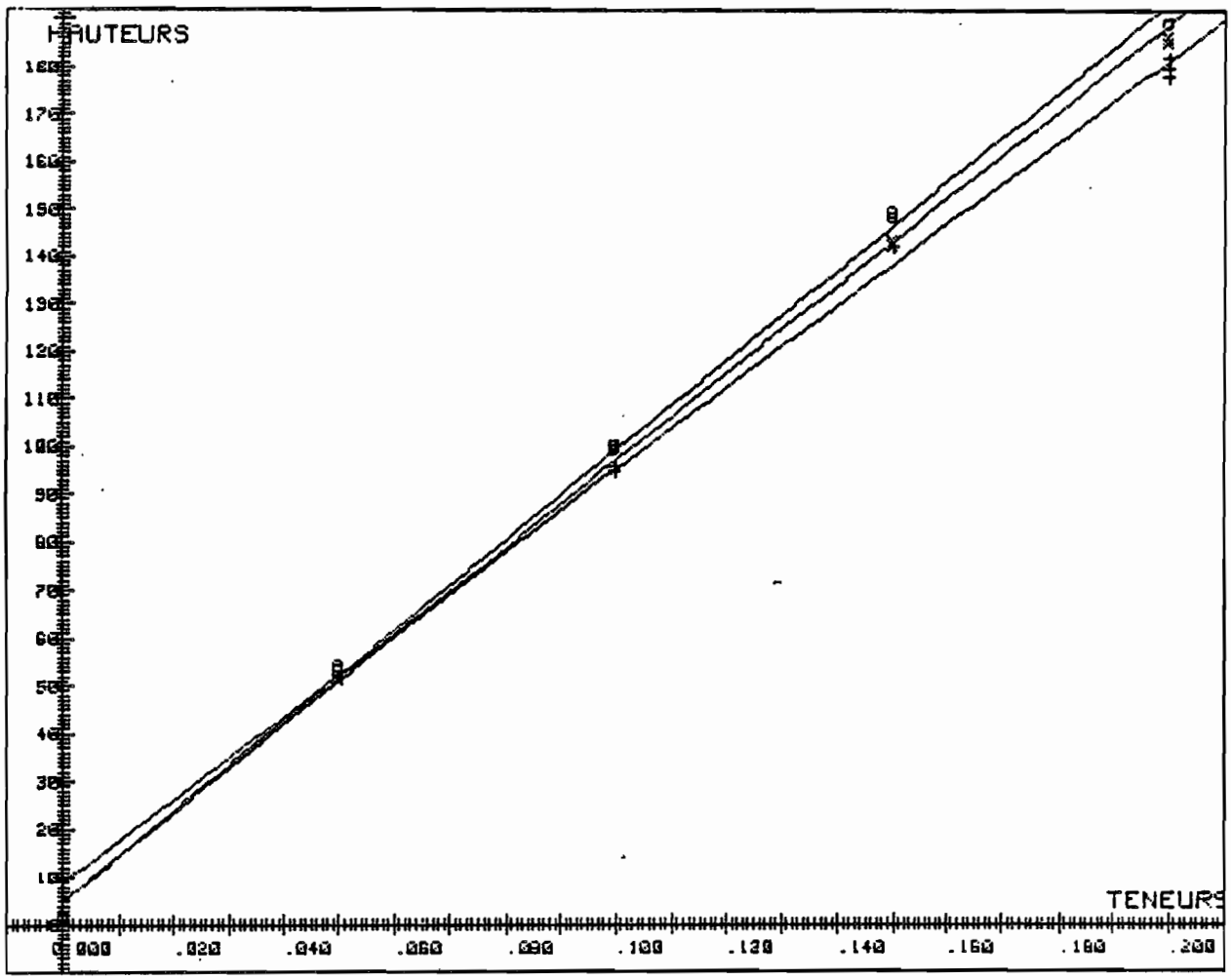
Ajustement quelqonque : Y = (Hpic)

Y = A(0) + A(1)*C + A(2)*C^2 + A(3)*C^3 +--------- + A(n)*C^n

R^2= COEFFICIENT DE DETERMINATION

REGRESSION AVEC 1 DEGRES D'AJUSTEMENTS
A(0)= 98.3448
A(1)= 114.2842
R2 = .1113
Abs(1-R2)= .8887

REGRESSION AVEC 2 DEGRES D'AJUSTEMENTS
A(0)=-5.4848
A(1)= 1101.5775
A(2)=-1005.3625
R2 = .9964
Abs(1-R2)= .0036



+ : ETALONAGE N° 1

o : ETALONAGE N° 2

× : ETALONAGE N° 3

Fig. 16 - Courbes d'étalonnage du cuivre.

2.1.6- Contrôle de la précision de dosage.

Le contrôle de la précision des dosages a été fait pour tous les éléments étudiés dans ce travail à partir d'une répétition de vingt mesures d'un même échantillon pris au hasard, dans une série, nous avons calculé la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation . La précision obtenue est très satisfaisante, les résultats sont consignés dans le tableau 22.

Tableau 22 Contrôle de la précision de dosage des éléments étudiés dans les plantes, (les concentrations sont en µg/ml).

	Mn	B	Fe	Cu	Zn	K	Ca	Mg	P
1	0,344	0,81	2,40	0,183	0,032	13,614	2,817	3,737	4,77
2	0,376	0,80	2,40	0,187	0,031	13,567	2,821	3,908	4,67
3	0,375	0,72	2,40	0,186	0,034	13,683	2,868	4,093	4,72
4	0,356	0,80	2,45	0,184	0,030	13,312	2,829	3,992	4,60
5	0,358	0,81	2,31	0,169	0,030	13.107	2,789	3,941	4,67
6	0,357	0,73	2,31	0,177	0,031	13.221	2,793	3,847	4,67
7	0,355	0,74	2,36	0,167	0,032	13,176	2,773	3,713	4,77
8	0,377	0,81	2,47	0,170	0,032	12,816	2,861	3,566	4,77
9	0,380	0,82	2,45	0,169	0,036	13,405	2,852	3,478	4,77
10	0,397	0,84	2,20	0,182	0,031	13,359	2,771	3,739	4,69
11	0,393	0,74	2,21	0,172	0,032	13,257	2,637	3,566	4,69
12	0,360	0,76	2,18	0,188	0,034	13,257	2,637	3,781	4,63
13	0,360	0,80	2,31	0,191	0,035	13,257	2,891	3,922	4,63
14	0,380	0,81	2,41	0,180	0,030	13,331	2,872	3,914	4,62
15	0,377	0,82	2,21	0,169	0,030	13,405	2,678	3,812	4,66
16	0,347	0,80	2,40	0,164	0,036	13,162	2,691	3,678	4,59
17	0,362	0,80	2,45	0,182	0,036	13,531	2,667	3,749	4,59
18	0,360	0,81	2,40	0,182	0,036	13,430	2,821	3,847	4,72
19	0,352	0,82	2,45	0,167	0,030	13,239	2,834	3,762	4,72
20	0,391	0,82	2,50	0,166	0,038	13,337	2,841	3,812	4,77
								3,907	
$\overline{X}$	0,370	0,79	2,36	0,18	0,0328	13,32	2,79	3,79	4,69
M	0,36	0,81	2,40	0,18	0,03	13,32	2,82	3,80	4,68
S^2	0,0001	0,0016	0,01	0,0001	0,000	0,04	0,01	0,02	0,0036
S	0,01	0,04	0,10	0,01	0,001	0,20	0,1	0,15	0,06
CV%	2,70	5,06	4,24	5,55	3,05	1,50	2,87	3,96	1,28

Légende :

X : Moyenne arithmétique.

M : Médiane

S^2 : Variance

S : Ecart - type

C.V% : Coéfficient de variation.

TABLEAU 23 Reproductibilité des résultats du dosage des échantillons de référence du CII (PINTA et CII,1975). (Moyenne et médianes exprimées en ppm).

	MAIS						FOIN					
	CII			Cette étude			CII			Cette étude		
	Cu	Mn	Zn	Cu	Mn	Zn	Cu	Mn	Zn	Cu	Mn	Zn
N	12	18	11	10	10	10	9	11	11	10	10	8
$\bar{X}$	11,800	66,094	28,027	11,290	73,615	26,142	11,41	245,8	70,59	11,850	249,190	68,612
M	11,650	66,700	27,000	11,200	76,765	26,242	11,40	242,00	70,00	11,850	247,390	68,485
S^2	2,569	21,401	12,526	0,0521	22,569	0,822	1,603			0,0517	24,40	2,813
S	1,611	4,626	3,539	0,228	4,751	0,907	1,266	29,77	8,66	0,227	4,940	1,677
C.V%	13,6	6,9	12,6	2,0	6,5	3,5	11,10	12,11	12,27	1,9	2,0	2,4

Légende

N : Nombre des données pour cette étude et nombre de laboratoires ayant effectué l'analyse par le CII.

X : Moyenne arithmétique

M : Médiane

S^2 : Variance

S : Ecart - type

C.V.% : Coefficient de variation.

2.1. . Contrôle des résultats.

Nous avons vérifié la reproductibilité de nos résultats à l'aide des échantillons étalons naturels de foin et de maïs préparés et analysés par les laboratoires du Comité inter-instituts d'études des techniques de diagnostic foliaire (PINTA et C.I.I.1975). Nous avons dosé ces échantillons de référence dans les mêmes conditions que celles de nos échantillons. Nous présentons les résultats dans le tableau 23. Ces résultats traités statistiquement s'avèrent très corrects.

Nous avons également contrôlé la justesse du dosage en comparant les résultats de cette étude avec ceux du C.I.I.(PINTA et C.I.I., 1975). Le tableau 24 donne ces résultats avec la différence en pourcentage. Nous constatons que nos résultats sont bien satisfaisants, la différence ne dépasse en aucun cas 10 %.

TABLEAU 24 Justesse des résultats.

La différence en pourcentage entre les résultats obtenus dans cette étude et les résultats du C.I.I.

	MAIS			FOIN		
	C.I.I	Cette étude	%	C.I.I.	Cette étude	%
Cu	11,800	11,290	- 4,32	11,41	11,850	+ 3,86
Mn	66,094	73,615	+ 10,22	245,80	249,19	+ 1,38
Zn	28,027	26,142	- 6,72	70,59	68,612	- 2,80
Fe	259,281	235,00	- 9,36	202,70	210,00	+ 3,60

IV.2.2. Spectrométrie d'absorption moléculaire et Application au dosage de (B,Fe,p).

2.2.1 Généralités et principe.

La spectrométrie d'absorption moléculaire fait partie des méthodes "traditionnelles" pour la détermination de certains éléments. C'est une méthode tout à fait valable et dans bien des cas on peut très utilement lui faire appel comme méthode de vérification ou de contrôle.

Le principe de cette méthode est la détermination de la concentration d'une substance d'après l'absorption d'une radiation monochromatique caractéristique de cette substance ; lorsqu'une solution colorée est traversée par un flux lumineux, elle ne laisse passer qu'une fraction de la lumière incidente et l'absorption résultante est liée à la concentration du composé coloré.

2.2.2 Dosage du bore, du fer et du phosphore.

- Principe de dosage du bore.

Dans cette méthode, le bore est dosé sous forme d'un complexe coloré, les inos borates réagissent avec l'azométhine H en milieu tamponné (pH environ 5) pour former ce complexe jaune stabilisé par l'acide ascorbique et mesurée spectrométriquement à 420 nm. Pour l'interférence du Fe, d'Al, du Cu et du Mo on ajoute l'EDTA qui masque ces interférences.

- Principe de dosage du fer.

Le fer est dosé en milieu acide (acide nitrique à 1 %), sous forme ferrique (Fe^{+++}).

Les ions Fe^{+++}, en milieu acide, réagissent avec les ions SCN^- pour donner des complexes ferrithiocyanates de couleur rouge mesurés spectrométriquement à 525 nm. Les ions ferreux Fe^{++}, éventuellement présents, sont, au préalable, oxydés par addition de persulfate d'ammonium.

- Principe de dosage du phosphore.

Le phosphore est dosé en milieu acide nitrique à 1% (même milieu que les solutions résultant de l'attaque de l'échantillon); après une formation du complexe phosphomolydique et réduction

par l'acide ascorbique, une coloration bleue se développe. Mesure spectrophométrique à 670 nm.

- Contrôle de la précision.

Ce contrôle a été fait à partir d'une répétition de vingt mesures d'un même échantillon pris au hasard dans une série. Sur ces vingt mesures, nous avons effectué le calcul statistique nécessaire, les résultats sont groupés dans le tableau 22.

IV. 2.3. La spectrométrie d'émission atomique avec atomisation dans un plasma induit (ICP), application au dosage du bore.

L'arrivée de l'ICP dans le laboratoire traduit bien l'apport du développement technique dans la recherche. Cette nouvelle méthode nous a permis de surmonter le problème du dosage du bore dans les sols, et d'étudier de retention du bore par les sols expérimentés. Le dosage du bore par ICP nous a bien montré l'efficacité et la sensibilité de cette nouvelle technique.

Il est hors de notre domaine de donner des explications détaillées sur cette technique d'avenir, mais il serait tout de même, intéressant d'en citer le principe de base.

2.3.1. Notions de plasma.

Ce sont LANGUMEN et TOUKAS dans les années 1920 qui ont introduit le mot "plasma" pour désigner un gaz ionisé, électriquement neutre, dans des tubes à décharge. Actuellement on appelle plasma un gaz partiellement ionisé et macroscopiquement, électriquement neutre. Les propriétés mécaniques d'un tel plasma sont identiques à celles des gaz neutres, par contre les propriétés électromagnétiques en différent à cause de la présence d'électrons libre en mouvement.

La principale caractéristique d'un plasma dont le premier appareil a été commercialisé en 1974 et sa température élevée (5000 à 15000°K tandis que celle de la flamme est de 3000°K) qui doit permettre d'atteindre des performances analytiques supérieures à celles des flammes. Cette particularité est à l'origine de l'intérêt que le plasma a suscité en analyse car il est en effet nécessaire de dissocier les combinaisons chimiques y compris les plus réfractaires.

Les plasmas sont souvent classés suivant leur degré d'ionisation (TRASSY et M ERMET, 1984). Le degré d'ionisation

$\alpha = \frac{n}{(no + n)}$ où no = densité d'atoms neutres.
n = " " ionisés

Si $\alpha < 10^{-4}$ le plasma est dit faiblement ionisé.

Si $\alpha > 10^{-4}$ " " " fortement " .

Pour un plasma d'argon en équilibre thermodynamique, comme celui que nous avons utilisé, la valeur $\alpha = 10^{-4}$ correspond à une température de 7000 K. à l'heure actuelle le plasma est certainement la méthode d'analyse sur solution la plus sensible qui soit (TRASSY et MERMET, 1984),avec peu d'effets interéléments, elle permet d'avoir accès à certaines longueurs d'ondes inexploitables en flamme et le spectre de bandes émis par le plasma est beaucoup moins important que dans le cas d'une flamme d'hydrocarbures (bandes intenses dues à C2 dans le domaine 460 à 520 nm.)
Cette technique permet aussi l'analyse multi-élémentaire simultanée, elle est utilisée pour les dosages des éléments nutritifs extractibles des sols (HOULT et al.,1980) et dans l'analyse des plantes (HALVIL et SOLTANPOUR, 1980 ; SPIERS et al., 1983).

2.3.2 - Appareillage et recherche informatisés des longueurs d'onde.

1) - spectromètre : c'est un spectromètre séquentiel SOPRA IPS 1500 haute résolution (focale 1150 mm réseau 2400 t/mn) à fente variable, domaine spectral 190 à 790 nm. Dispersion 0,26 nm/mm et résolution 0,01 nm. L'intensité de l'émission est mesurée par comptage de photons.
2) - Torche à plasma : c'est une torche philips à plasma induit par haute Fréquence (50MHz) avec brûleur en quartz. Nebuliseur pneumatique avec une pompe péristaltique Gilson.
3) - Informatisation : L'unité centrale est un micro-ordinateur (commodore CBM modèle 3032) qui possède son clavier, sa visualisation

sur écran vidéo et son imprimante.
Le microprocesseur de gestion des longueurs d'onde permet : l'initialisation automatique des longueurs d'onde par top optique et l'affichage par codeur optique des longueurs d'onde à ± 2 Pm, ce qui nous a permis l'optimalisation de la longueur d'onde pour le dosage du bore.
Le micro-ordinateur calcule les résultats d'analyse par rapport à une gamme d'étalon, de la concentration de chaque dosage, de coefficient de variation et de la répétabilité.
Pour la limite de détection on a pu atteindre jusqu'à 2,1 ppb.

- Condition analytique retenue : Longueur d'onde 249,778 nm, Hauteur de la torche 19 mm. Fente d'entrée : 50 - 60 µm. Fente de sortie 90 - 140 µm. Gaz vecteur 0,95 L/minute. Gaz plasma 18,5 L/mn.temps d'intégration 3S, puissance de générateur à plasma 1100 W.

IV. 3 - DOSAGE DES OLIGOELEMENTS TOTAUX ET EXTRACTIBLES DANS LES SOLS ETUDIES.

Dans ce travail qui porte sur les oligoéléments, il est de première importance de connaître les teneurs en oligoéléments de nos sols, ces teneurs constituent des données importantes montrant la différence en oligoéléments entre les sols des zones humides et ceux des zones sèches, ultérieurement nous tenterons d'approfondir cette idée comparative, par des tests biologiques (culture des plantes) nous éclaircirons d'une façon précise la différence entre la capacité nutritive spécifique et naturelle des sols de ces zones.

Nous donnons ici les résultats de ces dosages effectués par les différentes méthodes que nous venons d'exposer (tableau 25).

Les dosages sont portés sur cinq échantillons de chaque sol. Ces résultats caractérisent parfaitement les sols sur le plan oligoélément, il est très intéressant de noter les remarques suivantes :

TABLEAU 25- OLIGOELEMENTS TOTAUX ET EXTRACTIBLES A Hcl 0,1N (p.p.m) dans les sols étudiés.

1 - sol brun lessivé sur LIMON
2 - sol rendzine sur calcaire
3 - sol peu évolué sur alluvion.

OLIGOELEMENTS TOTAUX												
Elément	Mn			Cu			Zn			Fe		
Répétition	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	518,0	474,0	747,0	18,3	15,7	28,0	65,0	52,0	76,0	14060	19500	30700
2	522,0	480,0	732,0	18,7	18,1	28,3	65,0	53,0	69,5	13500	17909	30609
3	522,0	482,0	712,0	18,1	18,3	28,4	68,0	55,0	69,0	13706	17700	29400
4	526,0	488,0	735,0	18,9	18,7	28,0	63,0	54,5	71,0	14403	17016	31200
5	536,0	488,0	729	22,2	18,0	30,1	62,0	56,0	71,0	14800	17064	30730
Moyenne	524,8	480,8	731,0	19,24	17,76	28,56	64,0	54,1	71,3	14069	18106	30503

Suite du tableau 25

OLIGOELEMENTS EXTRACTIBLES à Hcl. 0,1 N												
Elément Répétition	Mn			Cu			Zn			Fe		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	74,5	61,1	28,5	0,50	2,31	0,10	0,59	2,08	0,35	718,8	45,31	27,59
2	80,6	61,1	30,80	0,50	2,19	0,090	0,59	2,08	0,39	672,5	45,31	26,23
3	74,0	60,4	24,1	0,50	2,24	0,11	0,45	2,04	0,46	677,5	42,27	27,41
4	80,0	61,1	26,5	0,50	2,19	0,10	0,64	1,83	0,39	721,2	43,82	25,82
5	76,6	61,25	25,8	0,50	2,24	0,10	0,64	1,83	0,39	717,9	46,71	27,06
Moyenne	77,14	60,99	26,54	0,50	2,23	0,1	0,58	1,98	0,40	701,6	44,68	26,82
* %	14,70	12,68	3,64	2,60	12,56	0,35	0,91	3,66	0,56	5,01	0,25	0,09

* Pourcentage des ologoéléments extractibles par rapport aux oligoéléments totaux.

1) les teneurs largement plus élevées du sol de la basse vallée de l'Euphrate (Région aride) par rapport aux sols de Grignon (Région humide).

2) une deuxième remarque plus révélatrice encore résulte des teneurs en oligoéléments extractibles à l'acide chlorhydrique 0,1N, beaucoup plus faibles dans le sol sur alluvions de la Basse vallée de l'Euphrate (Région sèche) que dans les sols de Grignon (Région humide), bien que l'un des deux sols de Grignon soit à pH élevé (7,9) et proche de celui du sol de la basse vallée de l'Euphrate (8,5), il contient beaucoup plus d' oligoéléments extractibles à l'acide chlorhydrique 0,1 N. On peut donc incriminer non seulement le pH du sol syrien mais aussi sa texture plus riche en éléments fins (argile et limon) qui retiennent davantage ces oligoéléments et les rendent moins accessibles par les racines des plantes; si on ajoute le facteur de sécheresse donc de manque d'eau on peut comprendre la possibilité très probable d'apparition de carence dans les sols de cette région.

Nous devons prêter attention au bore extrait à l'eau bouillante par rapport au bore total dans le sol de la basse vallée de l'Euphrate et par rapport au bore extrait à l'eau bouillante des autres sols étudiés (tableau 26), cette teneur nous laisse perplexe pour l'avenir lorsqu'on sait que les sols dans la basse vallée sont menacés de salinisation souvent accompagnée dans les zones arides de risque de remontée de sels du bore.

TABLEAU 26 - TENEURS DES SOLS EN BORE TOTAL (A) ET BORE SOLUBLE A L'EAU BOUILLANTE (B).

	BORE (p.p.m)					
	1		2		3	
	A	B	A	B	A	B
1	74,95	0,768	55,33	0,42	58,30	0,88
2	74,65	0,72	56,60	0,47	66,70	0,80
3	79,85	0,73	61,55	0,50	70,9	0,79
4	73,07	0,69	60,08	0,52	63,72	0,82
5	75,23	0,70	61,92	0,48	65,17	0,80
$\overline{M}$	75,55	0,72	59,10	0,48	64,96	0,82
% *	0,96		0,88		1,26	

* Pourcentage de bore soluble à l'eau (B) par rapport au bore total (A)

1 - sol brun lessivé sur limon

2 - sol rendzine sur calcaire

3 - sol peu évolué sur alluvion.

IV-4 - DOSAGE DE CHLOROPHYLLE.

Le dosage de chlorophylle est fait à l'aide du spectrophotomètre en mesurant les absorbances à 663 nm et à 645 nm dans des cubes de 2 cm^3 (longueur de passage de la lumière dans le cube étant de 20 mm).

La chlorophylle totale est donnée à partir des deux mesures d'absorbances par l'équation suivante :

- chlorophylle totale (mg/L) = $20,2\ A_{645} + 8,02\ A_{663}$

La quantité de chlorophylle a et b s'exprime par les équations suivantes :

- chlorophylle a (mg/L) = $12,7\ A_{663} - 2,69\ A_{645}$

- chlorophylle b (mg/L) = $22,9\ A_{645} - 4,68\ A_{663}$

La quantité de chlorophylle a et b peut être convertie en mg/g de matière fraiche par les équations suivantes :

$$\text{chlorophylle a (mg/g)} = \frac{12,3\ A_{663} - 0,86 A_{645}}{a \times 100\ XW}\ XV$$

$$\text{chlorophylle b (mg/g)} = \frac{19,3\ A_{645} - 3,6 A_{663}}{a \times 100\ XW}\ XV$$

où : A_{645} et A_{663} : sont les absorbances à 645 nm et 663 nm.

V : est le volume en ml.

a : est la longueur de passage de la lumière dans le cube (20mm dans notre cas).

W : est le poids Frais en gramme.

CHAPITRE V

ETUDE DE LA CINETIQUE DE RETENTION ET DE MOBILITE DES OLIGOELEMENTS DANS LES SOLS.

CHAPITRE V

ETUDE DE LA CINETIQUE DE RETENTION ET MOBILITE DES OLIGOELEMENTS DANS LES SOLS.

V - 1 - BUT ET PERSPECTIVE.

La rétention des oligoéléments par les sols fait intervenir des mécanismes très divers : les intéractions liquide - solide, les réations chimiques entre les constituants du complexe sol-solution, les processus biologiques.La mobilité du métal dans le sol est déterminée aussi par : les propriétés du sol, la quantité et le type des sites d'adsorption dans le sol, la concentration et le type des anions complexants (organiques ou non organiques)) (TYLER et Mc BRIDE, 1982) et les ions de compétition (spécialement H^+) dans la solution du sol. Tous ces paramètres font d'une telle étude un problème particulièrement complexe. Malgré les études nombreuses et importantes (GUPTA, 1971 ; KORTE etal, 1976; KRAKKAJ et NAGY, 1980 ; SIDLE et SOPPER, 1976; SIDLE et al., 1977 .....) ce problème n'est pas encore complétement résolu; il est différent en cas de sols cultivés et de sols nus. La compréhension de ce problème nécessite des études complémentaires et comparatives,qui permettent d'expliquer, tel est le but recherché ici, la différence entre la rétention, la migration et la précipition des oligoéléments influencées par les différents paramètres cités ci-dessus, d'une part en l'absence de la plante et d'autre part en présence de celle-ci. Nous cherchons aussi le comportement des oligoéléments fertisants apportés au sol en présence de différents réactifs tel que l'acide chlorhydrique, le DTPA et l'eau; cela donnera une idée intéressante sur l'extraction séquentielle des oligoéléments apportés et ceux préexistants au sol.

Cette méthode d'extraction séquentielle, destinée à séparer les formes liées à des phases de rétention différentes est encore peu utilisée (JUSTE, 1983).

Le recours au traceur radioactif ^{54}Mn est indispensable pour le but recherché,il permet de déterminer la nature du manganèse extrait par les différentes élutions.

La technique des éléments marqués nous apporte des résultats intéressants pour la fertilisation oligominérale.

Nous étudirons enfin à l'aide de percolation sur colonnes l'effet de la concentration du bore du manganèse sur la rétention et la migration des autres oligoéléments (Cu, Fe) et certains éléments majeurs (Ca, Mg, K).

V - 2 - METHODE D'ETUDE ET EXPERIENCES EFFECTUES.

2.1. Méthode d'étude.

Le travail a été mené sur les trois sols utilisés dans les expériences de culture en serre. Le sol, tamisé à 2 mm, séché à l'air, a été disposé dans des colonnes en plastique de 3,5 cm de diamètre et de 50 cm de longueur. La hauteur que les sols occupent dans les colonnes est identique pour les trois sols, elle est de 30 cm, pour que la distance traversée par les éluants soit identique. La densité des sols n'étant pas la même, nous étions amenés à travailler sur des poids de sols différents (250 g pour le sol de rendzine et le sol sur limon et 270 g pour le sol sur alluvion). Les colonnes sont enveloppées de papier noir pour éviter un éventuel développement des algues dans les colonnes.

Les colonnes contiennent à partir de bas (voir fig. 17) :

1 - un bouchon en plastique traversé par un tuyau de 3 mm de diamètre, qui drainel'élua t dans un flacon.

2 - deux disques de papier feutre séparés d'un papier filtre pourla filtration de l'éluant.

3 - 50 grs du sable de Fontainebleau lavé au préalable 16 h. à l'acide chlorhydrique 0,5 N puis rincé à l'eau biéchangée jusqu'à la neutralité.

4 - Le sol rempli de la même manière dans toutes les colonnes .

5 - un bouchon en plastique traversé comme précédemment par un tuyau qui amène par gravité l'éluant, il est muni d'une pince de "MOHR" permettant le réglage de la vitesse d'élution à 0,4 ml/mn.

Nous avons utilisé, tout au long de l'expérience, de l'eau bidistillée biéchangée (eau la mieux dépourvue de bore et de manganèse).

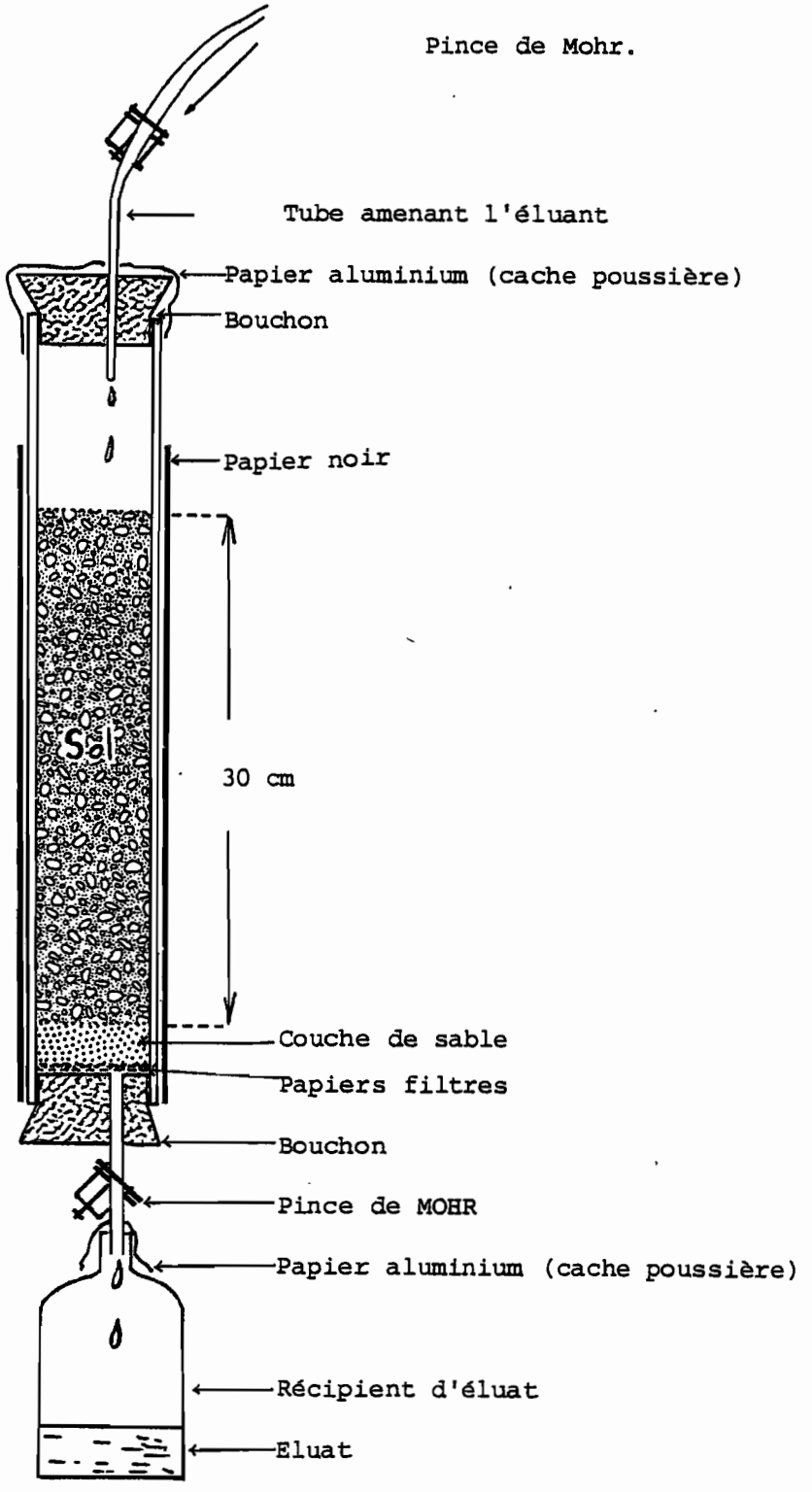


Figure 17 - Schéma d'une colonne d'élution.

Nous avons commencé par une percolation sur colonnes correspondantes de 150 ml de solution de bore et de manganèse aux doses choisies, sous forme d'acide borique et de sulfate de manganèse ($Mn\ So_4, H_2O$). Les colonnes sont abandonnées pendant 48 h.

L'eau et les réactifs d'extraction servant d'éluants dans l'ordre croissant de leur capacité d'extraction soit :

1 - L'eau.

2 - Une solution contenant : le DTPA acide diéthylène triamine penta acétique) 0,005 M + le TEA (triéthanol amine) 0,1M + du chlorure de calcium 0,01 M, cette solution est ajustée à pH 7,3.

3 - une solution d'acide chlorhydrique 0,1 N. Nous avons choisi ces trois éluants pour les raisons suivantes : l'eau étant d'une part un éluant naturel agissant dans la nature sur les processus de dissolution, rétention,désorption, absorption ... des oligoéléments dans les sols; c'est aussi le réactif le plus utilisé pour l'extraction du bore. Le DTPA est de plus en plus utilisé depuis sa première utilisation par LINDSAY et NORVELL en 1967)(cité par LINDSAY et NORVELL 1978) il s'avère être un chélatant présentant une constante de stabilité très favorable avec le fer, le cuivre, le manganèse et le zinc. Il permet d'étudier la disponibilité de ces éléments tout en évitant une dissolution excessive de calcaire car il est tamponné par le TEA (pKa = 7,8) à pH faiblement alcalin 7,3. (JOSHI et al., 1983; LINDSAY et NORVELL, 1978; SHUMAN et ANDERSON, 1974). D'ailleurs SHUMAN et ANDERSON (1974) conseillent la présence de TEA dans la solution de DTPA dans le cas des sols à pH 5,8 à 7 ce qui est le cas de nos sols. L'acide chlorhydrique 0,1N étant un réactif d'extraction des oligo-éléments et des éléments majeurs à la fois, il est utilisé depuis longtemps.

Pour chacun de ces trois éluants : nous avons procédé à cinq prélèvements de 200 ml au rythme d'un prévélement/jour, la percolation étant arrêtée la nuit (nous avons choisi ce nombre de cinq à la suite d'un essai préliminaire qui a montré une relative stabilité d'extraction au bout de cinq prélèvements). Des analyses sont effectuées sur ces prélèments comprenant les dosages suivants:le bore par spectrométrie d'émission de plasma (SOPRA IPS 1500) qui s'avère être la meilleure méthode de dosage pour le bore surtout lorsque les teneurs sont très faibles et que

l'éluat est parfois chargé de matière organique colorant en jaune cet éluat, ce qui est souvent notre cas; le cuivre, le manganèse et le fer sont également dosés par spectrométrie d'émission de plasma (SOPRA.IPS 1500). Pour l'expérience avec ^{54} Mn radioactif les dosages sont effectués : par spécromètrie de plasma (SOPRA.IPS 1500) pour le bore; par spectrométrie d'absorption atomique en four pour le manganèse, par spectrométrie d'absorption atomique en flamme pour le potassium, le calcaire et le magnésium. Le manganèse radioactif ^{54}Mn est dosé par comptage de la radioactivité (rayon γ) émise par le ^{54} Mn; tous les comptages, effectués avec un compteur (N.a.I.Tl) à scintillation liquide mais sans solution scintillante., ont été réalisés sur 1 ml d'éluat en utilisant comme témoin des parties aliquotes de la radioactivité introduite dans chaque colonne.

Des mesures de pH pour les différents éluats sont effectués afin de suivre l'évolution du pH dans le temps, et l'influence de cette évolution sur l'extraction.

2.2. Expériences effectuées.

Deux expériences sont réalisées. La première avec le bore et le manganèse stable et la deuxième avec le traceur ^{54}Mn radioactif, cette deuxième expérience a été réalisée au centre d'étude nucléaire de CADARACHE (Service radioagronomie laboratoire du groupe sols et fertisants dirigé par Monsieur J.C.FARDEAU).

Dans la première expérience nous avons appliqué les traitements suivants aux trois types de sols étudiés au nombre d'une colonne par traitement et par sol (il s'agit d'un plan factoriel 2^2).

1 - traitement à blanc (sans apport de bore et de manganèse) ou contrôle,
2 - traitement avec apport de 20ppm de bore et sans apport de manganèse (B = 20ppm)
3 - traitement avec apport de 30ppm de manganèse et sans apport de bore (Mn = 30ppm).
4 - traitement avec apport de 20ppm de bore et 30ppm du manganèse (B=20 et Mn = 30ppm).

Dans la deuxième expérience nous avons appliqué les traitements suivants aux trois types de sols étudiés au nombre également d'une

colonne par traitement et par sol :

1 - traitement à blanc (contrôle)

2 - traitement avec 21ppm de manganèse et 3pp de bore (B = .5 et Mn = 21),(doses utilisées dans l'expérience de culture dans ce travail).

3 - traitement avec 30ppm de manganèse et 20ppm de bore (B = 20 et Mn = 30).

Le choix de ces doses élevées a été guidé par le souci d'avoir des résultats d'extraction assez différents afin de permettre une comparaison significative.

Il est à noter que le temps de prélèvement de 200 ml d'éluat n'est pas le même pour les trois sols, il est le plus long pour le sol peu évolué sur alluvion à cause de sa texture très fine (voir tableau 4 chapitre II) et son indice d'instabilité structurale très mauvais : 5,5 (voir tableau 6 chapitre II). Ce temps est voisin pour les deux autres sols, le sol brun lessivé sur limon et le sol rendzine sur calcaire (à titre indicatif nous avons contrôlé le temps des premiers prélèvements : 7 h pour le sol sur alluvion, 5 h pour le sol de rendzine et 4 h 30 pour le sol sur limon).

V - 3 - EXPERIENCE AVEC BORE ET MANGANESE STABLE.

Nous donnons ici les résultats obtenus sur la rétention et la mobilité des oligoéléments dans nos sols après apport de bore et de manganèse (Tous les résultats sont calculés en $\mu g.g^{-1}$ d'élément dans le sol).

3.1. L'élution du cuivre : L'élution du cuivre par les différents éluants en fonction du type du sol et des apports en bore et en manganèse est représentée par les figures 18,19,20.La figure 18 montre l'élution du cuivre du sol sur limon; il ressort que l'élution du pool des ions solubles à l'eau est très faible (le maximum extrait dans ce cas est 0,076 µg/g ou 0,8 % de cuivre total en cas du blanc).L'élution au DTPA 0,005 M du pool des ions de cuivre extractible est beaucoup plus importante : le cuivre entrainé augmente d'une façon très remarquable pour le deuxième prélèvement pour chuter ensuite jusqu'au cinquième prélèvement. Ce maximum montre la présence d'une partie de cuivre facilement soluble au DTPA.

L'apport du bore rend le cuivre plus facile à complexer et à entrainer par le DTPA tandis que l'apport de 30ppm de manganèse ou

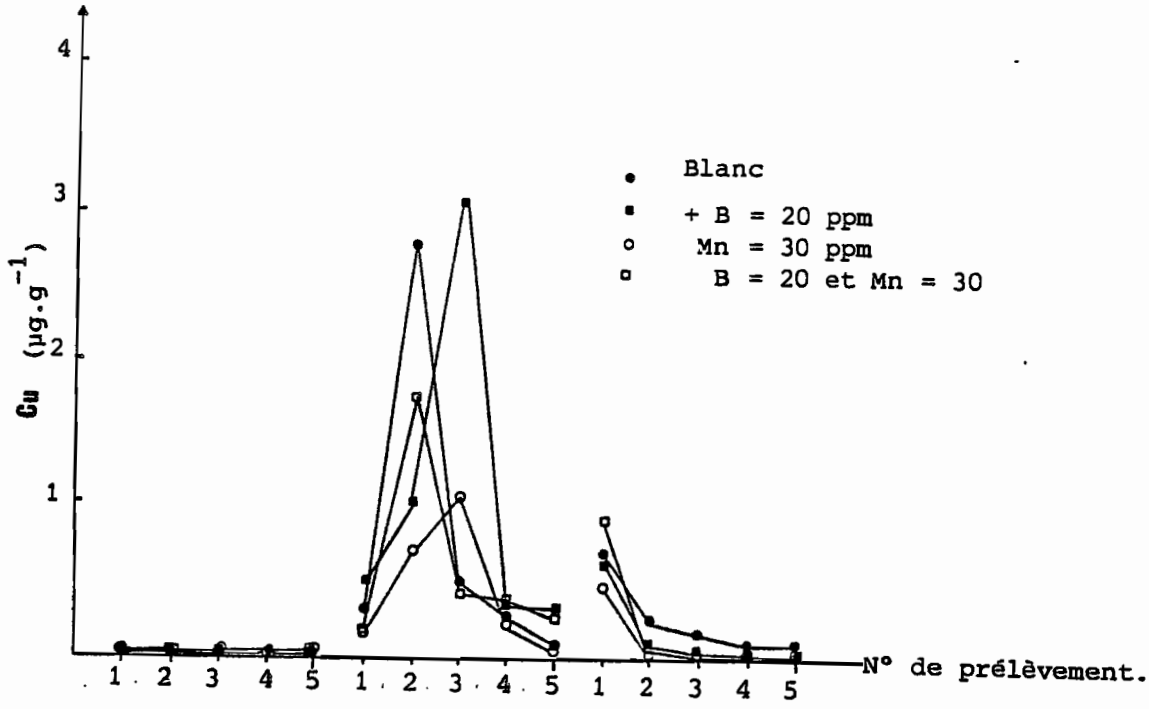


Figure 18 - Cuivre élué du sol sur limon par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

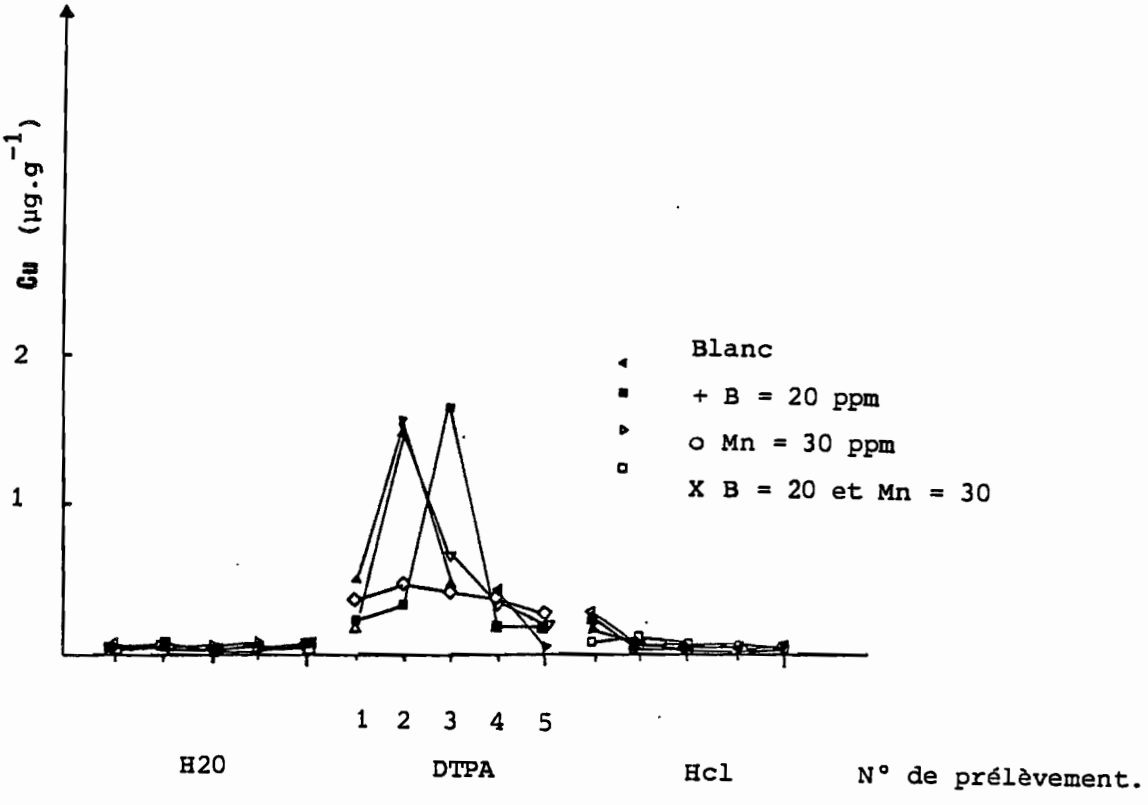


Figure 19 - Cuivre élué du sol de rendzine par élution de différents éluants en fonction du bore du manganèse apportés.

l'apport simultané de ces deux oligoéléments,le rend plus difficile à complexer et à entraîner par le DTPA par rapport au cas du blanc (sans apport ni de bore ni de manganèse). Le DTPA dans le cas du blanc extrait 20,8 de cuivre total (ce résultat est calculé à partir du cuivre extrait pendant les cinq prélèvements et du cuivre total tableau 25 chapitre IV), 12% dans le cas d'apport de 30ppm de manganèse,28 % dans le cas d'apport de 20ppm de bore et 16% dans le cas d'apport de 20ppm de bore et de 3ppm de manganèse.

L'élution du cuivre à HCL 0,1N ayant lieu après l'élution au DTPA est moins importante; c'est le premier prélèvement qui est le plus riche dans tous les cas. La totalité du cuivre extrait avec cet éluant est : 6,4% dans le cas du blanc, 4% en présence de 20ppm de bore, 2,4% en présence de 30ppm de manganèse et 4% en présence des deux oligoéléments ensemble. Tous les réactifs extraient plus de cuivre du sol brun lessivé sur limon que des deux autres sols,ce qui est en rapport avec le pH et la teneur en argile plus faible dans le premier sol donc favorable à l'extraction de cet élément.

L'extraction par les différents éluants du sol de rendzine, bien que quantitativement plus faible, ressemble dans son comportement à celle du sol sur limon. La capacité de rétention du cuivre plus forte dans ce sol que dans le précédent est dûe à plusieurs facteurs : pH plus élevé (7,9 contre 6,3), Matière organique plus élevée(10% contre 3,5%) et fraction argileuse plus élevée également (26,6% contre 17,9%). En cas d'élution à l'eau le cuivre dissous et entraîné est négligeable et ne change pas sous l'effet de différents apports du bore et du manganèse (0,9% pour le blanc 0,7% en présence de 30ppm de Mn, 1,2% en présence de 20ppm de B et 0,5 % en présence de 20ppm de B et 30ppm de Mn). L'élution au DTPA est la plus importante car il peut complexer et entrainer plus de cuivre retenu surtout sur la matière organique. L'apport de manganèse réduit sérieusement l'extraction du cuivre (1,8 µg/g contre 2,9 µg/g dans le cas du blanc sans ajout de B et de Mn) ce qui représente 10,4% du cuivre total contre 16,36% dans le cas du blanc. Par contre l'apport de bore n'affecte pas sérieusement cette extraction (au total 2,5 contre 2,90 µg/g ou 14,3% contre 16,4% de Cu total); de même l'apport des deux éléments ne l'affecte pratiquement pas (2,8 µg/g contre 2,9 µg/g dans le cas du blanc). L'élution à l'acide chlorhydrique mis à part le premier prélèvement n'extrait que des quantités né-

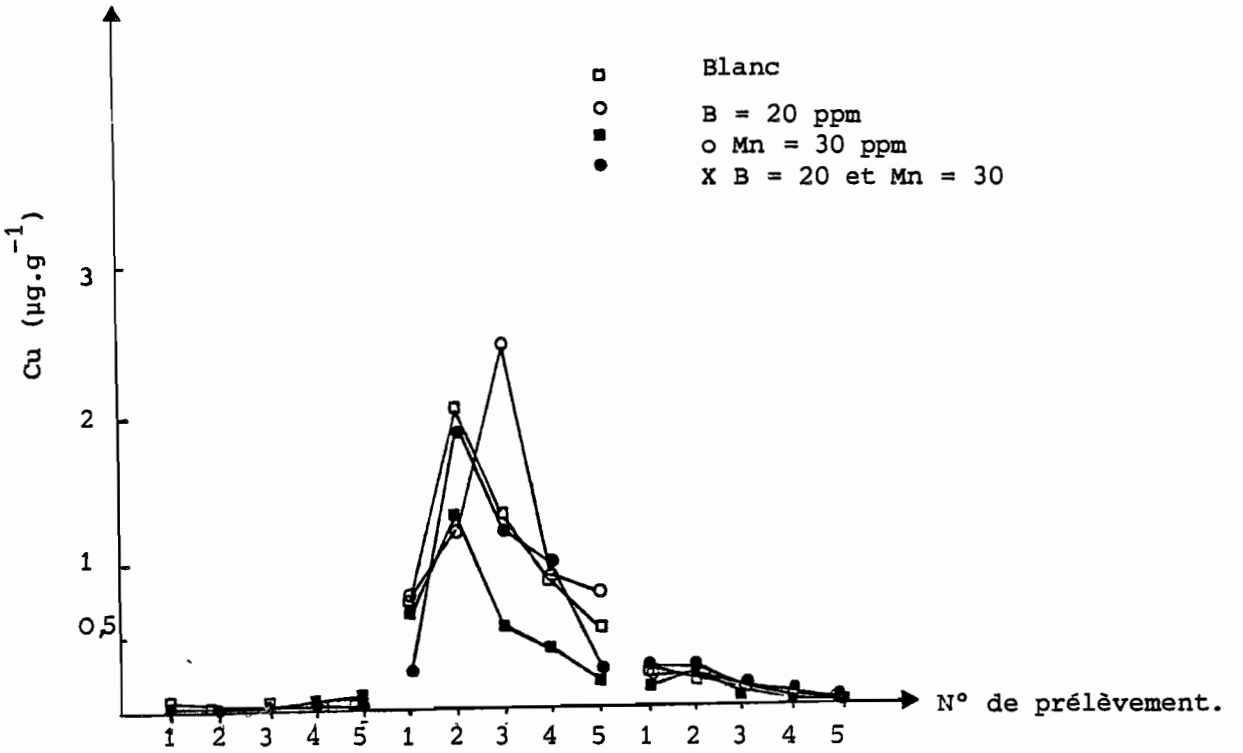


Figure 20 - Cuivre élué du sol sur alluvion par élution aux différents éluants en fonction de manganèse et de bore apportés.

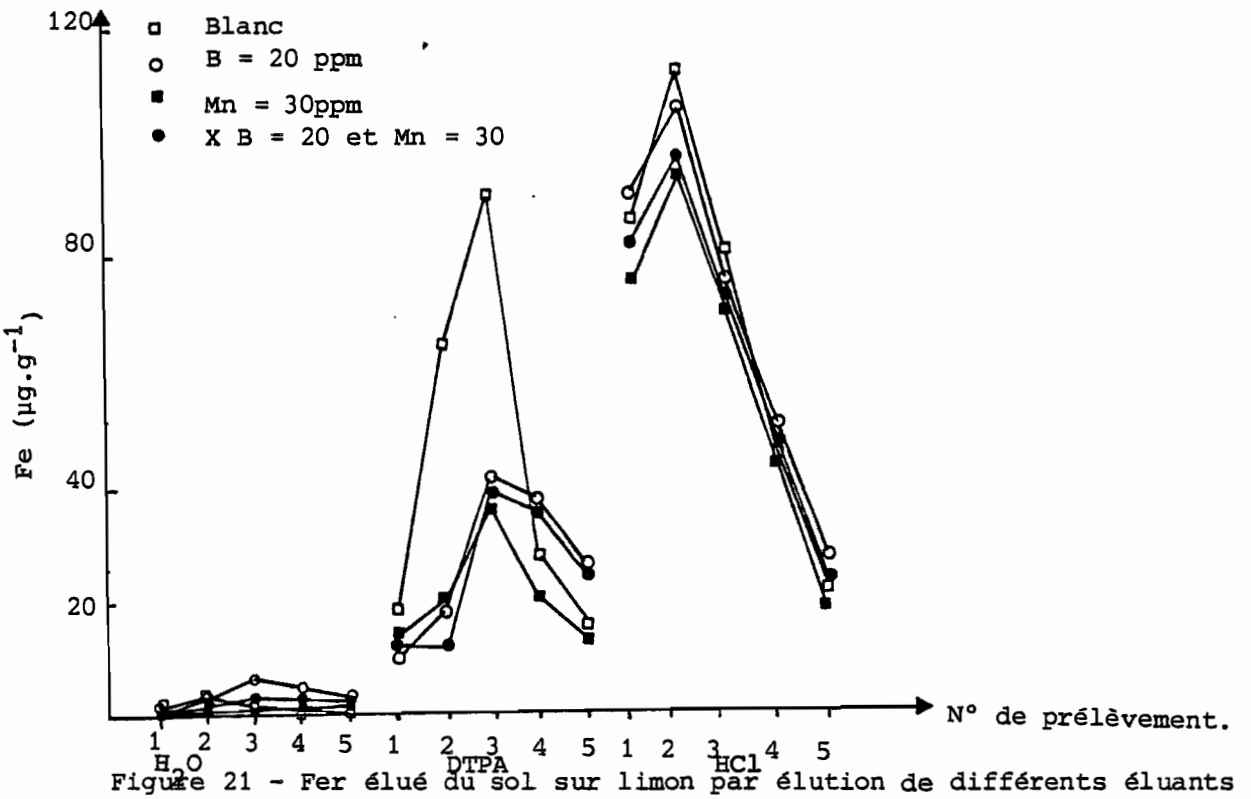


Figure 21 - Fer élué du sol sur limon par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

gligeables; la différence en fonction d'apport du bore ou du manganèse est également négligeable pour les quatre derniers prélèvements.

En cas de sol peu évolué sur alluvion l'élution du cuivre est intermédiaire et ressemble dans son comportement aux deux sols précédents (fig. 20) : élution à l'eau minime et négligeable, absence de relation entre apport de bore et de manganèse et cuivre élué.

L'élution au DTPA se traduit par : une baisse sévère du cuivre élué sous l'influence de manganèse apporté par rapport au témoin (au total 2,8 µg/g et 5,0 µg/g respectivement ou 9,8% contre 17,4% du cuivre total). Par contre l'ajout de bore facilite la dissolution du cuivre qui passe par un maximum à la troisième fraction et décroît sensiblement à la quatrième pour se stabiliser à la cinquième fraction (le DTPA extrait au total 5,5 µg/g contre 5,0 µg/g dans le cas du blanc). L'ajout des deux oligoéléments ensemble a une influence soustractive et non pas cumul ative (voir fig. 20) : le DTPA dans ce cas extrait plus qu'en cas d'ajout de manganèse et moins qu'en cas d'ajout de bore, il extrait au total 4,2 µg/g. ou 14,7% du cuivre total.

3.2. L'élution du fer.

Pour les trois sols c'est l'élution à l'eau qui entraîne le moins de fer. Les figures (21. 22.23) montrent une mobilisation négligeable de cet élément dans l'éluat à l'eau par rapport à l'éluat recueilli avec les autres réactifs; parmi les trois sols, c'est au sol sur limon avec apport de bore que l'eau extrait le plus de fer (fig. 21) au total 18,3 µg/g contre 7,6 µg/g pour le blanc ou 0,13% contre 0,06% du fer total.

L'acide chlorhydrique extrait plus du fer du sol sur limon que des autres sols étudiés bien que le fer total soit le plus faible: 1,4 % sol sur limon contre 1,8 % et 3,1% (sol de rendzine et sol sur alluvion).

L'apport du bore et du manganèse séparément ou ensemble réduit l'élution de fer sauf pour le sol de rendzine où l'apport du bore ne semble pas avoir cet effet. C'est l'apport du manganèse qui décroît le plus l'extraction du fer à l'acide chlorhydrique.

Cette image se répète en cas d'élution au DTPA et en présence de bore, de manganèse ou des deux éléments à la fois. L'ajout des deux oligoéléments simultanément a un effet intermédiaire entre les effets

individuels; ainsi, dans le cas du sol sur alluvion l'apport du bore diminue de 20,7 % le fer extrait, l'apport du manganèse le diminue de 35,6% tandis que l'apport de ces deux éléments le diminue de 27,5% ces effets sont particulièrement nets , pour la deuxième fraction à l'exception du sol de rendzine ou ces effets se manifestent surtout à la première fraction (fig. 22). Il est à noter que le sol peu évolué sur alluvion de la vallée de l'Euphrate tout en étant le plus riche en fer total est le plus pauvre en fer extractible aux différents éluants (dans le cas du blanc l'acide chlorydrique extrait 0,2% du fer total contre 2,3% pour le sol sur limon et 0,8% pour le sol de rendzine) ceci peut résulter du fait que le fer dans ce sol se trouve sous forme difficilement extractible par les différents éluants ou adsorbé avec plus de force que la capacité d'extraction de ces éluants ne le permet, même si l'élution se fait en milieu saturé et avec une structure mauvaise qui ne favorise pas la migration de cet élément hors des colonnes.

3.3. L'élution du manganèse.

3.3.1. Elution du manganèse du sol sur limon.

La cinétique de l'élution du manganèse est montrée sur la figure (24), nous constatons que cet élément est très peu élué à l'eau par rapport aux autres éluants, surtout le DTPA. Dans le meilleur des cas (apport de 30ppm de manganèse) son élution est de 0,83 µg/g pour le troisième prélèvement (fraction) et de 2,1 µg/g au total, quand on compare cette quantité avec celle extrait dans le cas du blanc (sans ajout du manganèse ni du bore) 1,3 µg/g on peut supposer que le manganèse extrait est principalement le manganèse ajouté 48 h avant l'élution à l'eau, cette quantité représente 6,5 % du manganèse apporté, c'est donc le manganèse qui est resté facilement soluble à l'eau.

La percolation au DTPA s'avère la plus efficace car il extrait une quantité du manganèse dépassant celle ajoutée; toutefois nous ne pouvons pas dans cette expérience affirmer que l'extraction du manganèse ajouté se fait en premier, puisque dans le cas du blanc le DTPA extrait à la première fraction une quantité comparable à celle en cas d'ajout du manganèse (16,8 et 19,2 µg/g respectivement, voir fig. 24), Ceci nous a conduit à répéter l'expérience avec utilisation du traceur ^{54}Mn.

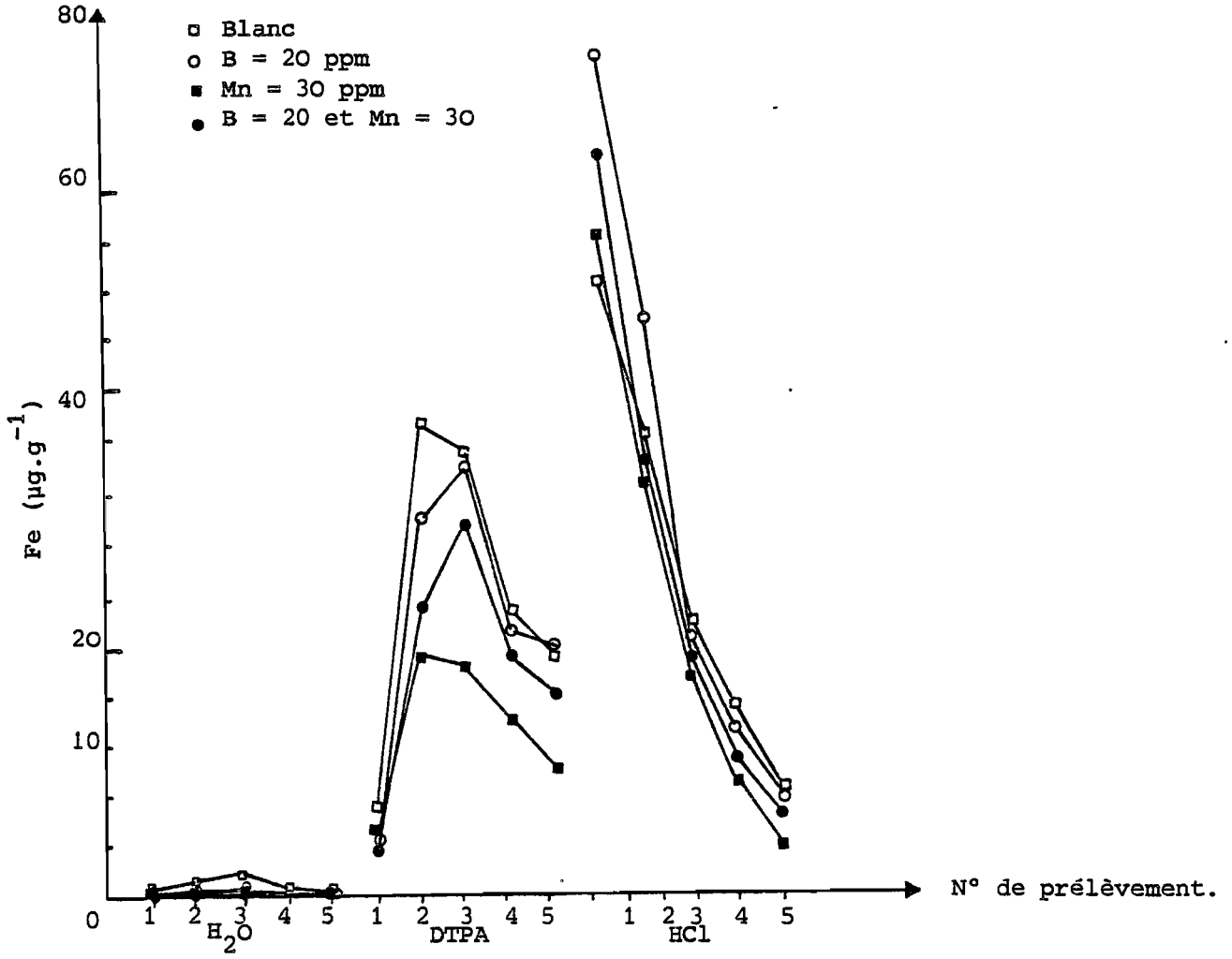


Fig. 22 - Fer élué du sol de rendzine par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

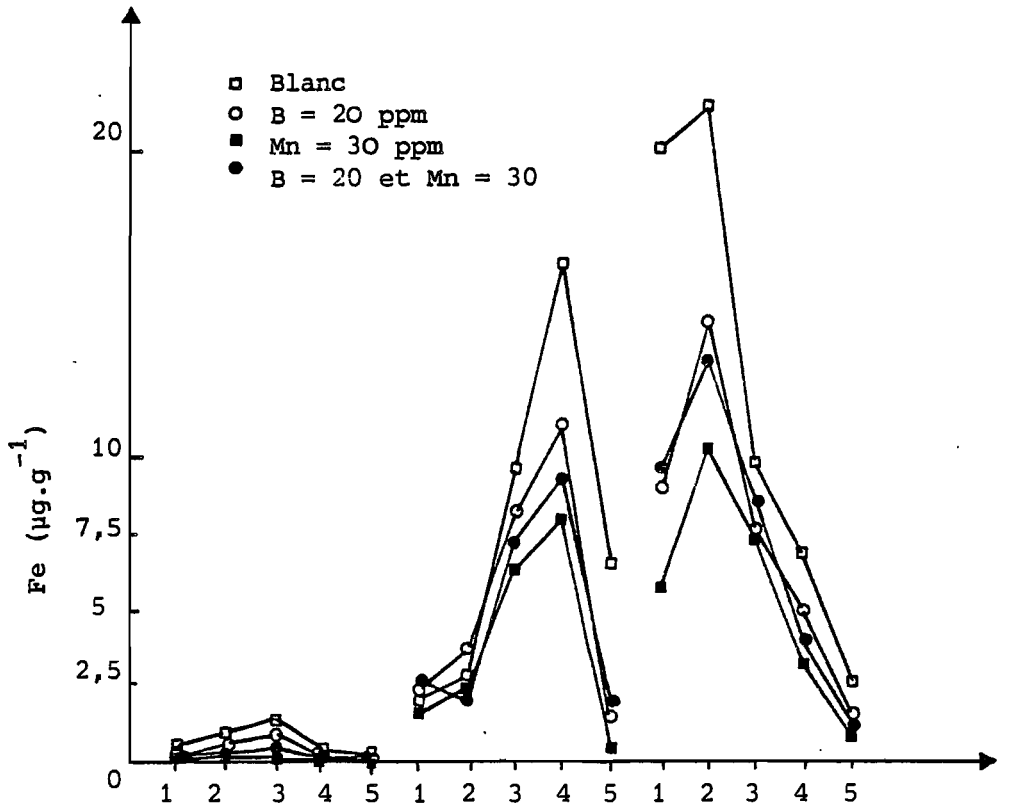


Fig. 23 - Fer élué du sol sur alluvion par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

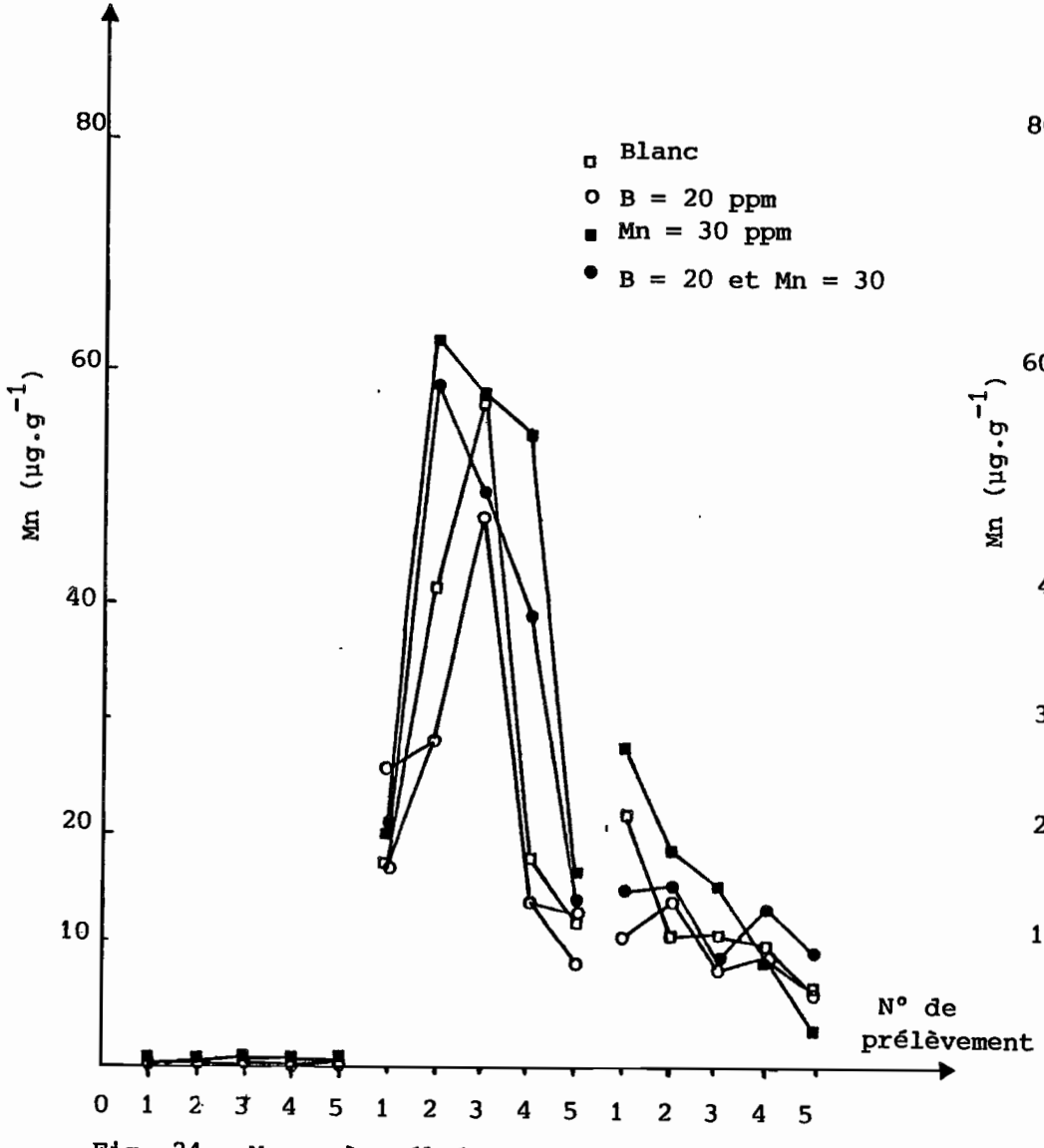


Fig. 24 - Manganèse élué du sol sur limon par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

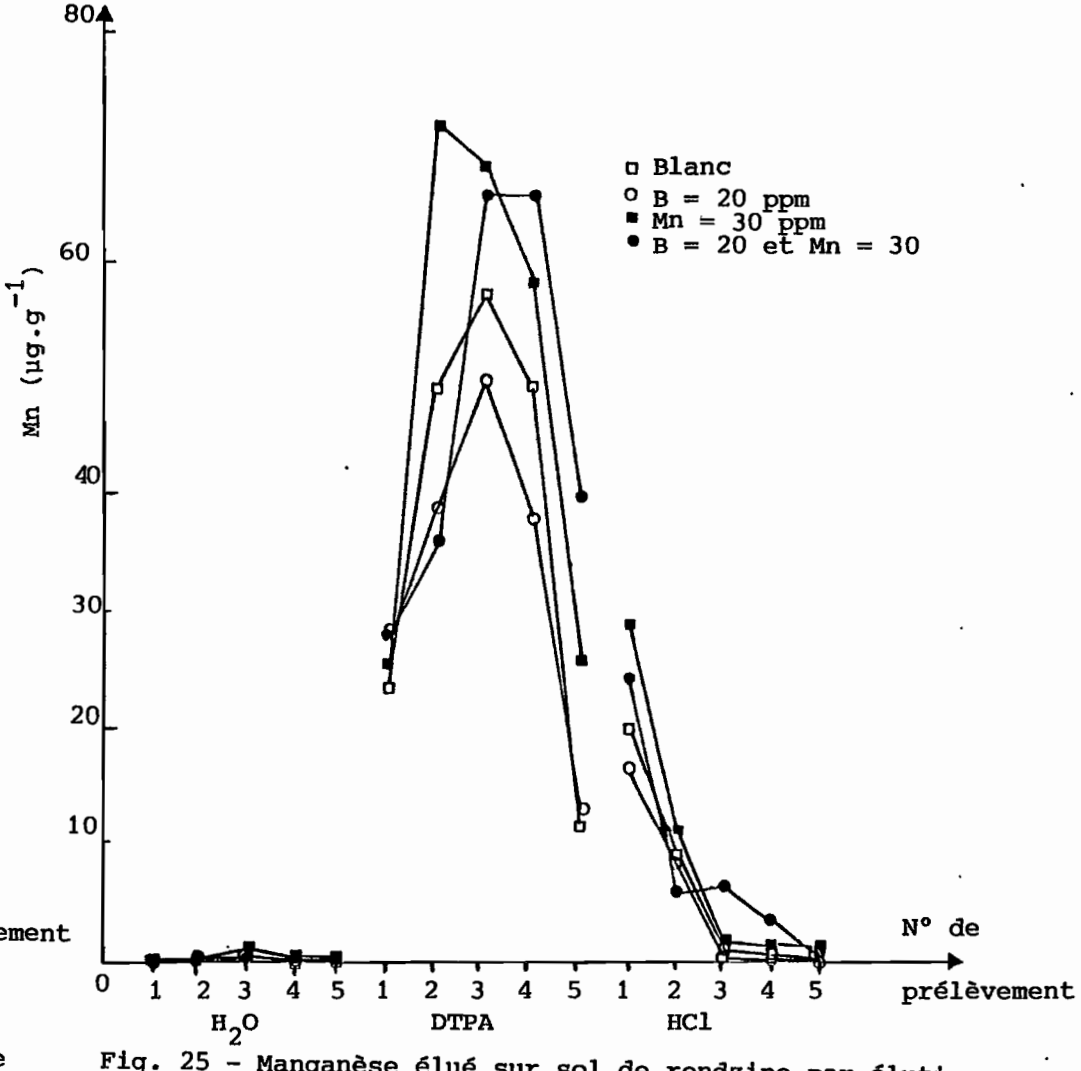


Fig. 25 - Manganèse élué sur sol de rendzine par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

L'élution au DTPA dans le cas du blanc montre un accroissement du manganèse extrait jusqu'à la troisième fraction puis une chute importante (de 55,7 pour la 3 ème fraction à 16,6 µg/g pour la 4 ème et 12,2 µg/g pour la 5 ème fraction) ce qui laisse supposer que le volume de DTPA percolé et la vitesse d'élution sont des facteurs importants pour l'extraction du manganèse; lorsqu'il n'y a pas eu d'apport extérieur la courbe d'extraction montre (fig. 24) : un maximum à la deuxième fraction suivie d'une baisse moins accentuée pour la troisième et la quatrième fraction. Nous donnons dans le tableau 27 les pourcentages du total du manganèse extrait au DTPA par rapport au manganèse total du sol (cas du blanc, Mn total = 524ppm).

Nous pouvons déduire que le bore ajouté a un effet négatif sur l'extraction du manganèse par le DTPA, il réduit également l'extraction du manganèse quand il est ajouté avec ce dernier.

L'élution à l'acide chlorhydrique après celle au DTPA solubilise beaucoup moins de manganèse (probablement en raison d'une nouvelle phase de rétention plus forte); cette élution comme celle au DTPA, si on regarde les courbes de figure 24, est en relation avec le manganèse et le bore apportés. L'acide chlorhydrique 0,1 N modifie au fur et à mesure le pH de l'éluat ce qui suppose une extraction croissante (le pH passe de 4,6 pour le premier prélèvement à 2,4 pour le cinquième) en fait ceci n'a pas eu lieu dans la réalité, nous pouvons penser que le manganèse extractible par l'acide chlorhydrique 0,1N a beaucoup diminué. En réalité nous assistons à la solubilisation la plus importante au cours du premier prélèvement à l'exception d'une anomalie en cas d'apport du bore. La décroissance de l'élution du manganèse est importante et continuelle en cas d'apport du manganèse. Cet éluant extrait au total les pourcentages donnés dans le tableau 27. Nous constatons ainsi que la différence totale est minime.

Tableau 27 - Elution totale du manganèse(en % du Mn total du sol) des différents sols par le DTPA et l'acide chlorhydrique.

Elément ajouté (ppm).	Mn/DTPA			Mn/ Hcl		
	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A
Blanc	24,1	38,7	17,5	11,3 %	6,3	6,3
B = 20	19,2	34,0	13,8	9,04	5,3	5,6
Mn = 30	19,2	45,4	23,2	13,04	9,1	7,6
B=20 et Mn=30	31,2	40,2	18,6	11,1	8,2	6,7

Tableau 28 - Elution totale du bore (en % B total de sol) des sols étudiés à l'eau, au DTPA et au Hcl.

Elément ajouté (ppm)	B/H20			B/DTPA			B/Hcl		
	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A
Blanc	1,5	1,2	1,7	1,1	0,49	0,89	1,0	0,93	0,91
B = 20	13,5	14,8	18,4	2,1	3,0	1,2	1,3	2,4	0,96
Mn = 30	1,1	1,2	1,2	1,3	0,87	0,5	0,97	0,94	0,69
B=20 et Mn = 30	11,2	12,2	14,3	1,7	3,1	0,6	0,87	1,9	0,81

Légende : S.L : Sol sur limon.

S.R : sol de rendzine

S.A. : sol sur alluvion.

3.3.2. L'élution du manganèse du sol de rendzine.

L'élution de cet élément se comporte comme celle du sol sur limon (fig. 24 et 25). L'élution à l'eau est négligeable par rapport au manganèse total, même le manganèse ajouté n'est pas solubilisé.

L'élution au DTPA comme le montre la figure 25 est la plus importante, d'ailleurs cet agent complexant extrait plus de manganèse de ce sol que de celui sur limon bien que ce dernier soit relativement plus riche en manganèse total (voir tableau 25 chapitre IV), il entraîne dans l'éluat une quantité de manganèse supérieure à celle ajoutée.

Comme précédemment il n'est pas possible de distinguer le manganèse ajouté de celui du sol; ce problème sera repris avec le traceur ^{54}Mn. L'élution du manganèse commence faiblement pour tous les traitements pour monter au deuxième prélèvement, en cas d'apport du manganèse, elle redescend lentement ensuite jusqu'au quatrième prélèvement à partir duquel il chute, cette chute est semblable pour tous les traitements. Pour les autres traitements, le manganèse faiblement retenu par le sol et soluble au DTPA, augmente jusqu'à la troisième fraction pour décroître ensuite (fig. 25).

Le total du manganèse extractible au DTPA par rapport au manganèse total (480,8 en cas de non ajout de Mn et 480,8 + 30 = 510,8 ppm de Mn en cas d'ajout est consigné dans le tableau 27 . La différence entre le blanc et le traitement avec ajout serait dûe au manganèse apporté qui représente 6,2 % du manganèse total + 38,7 % = 44,9 % ce qui est sensiblement voisin au pourcentage trouvé en cas d'apport du manganèse (tableau 27). Il est à noter que le bore tend au total à diminuer le manganèse extrait.

L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N est sensiblement moins importante que celle au DTPA 0,005 M, mais est en relation également avec l'apport du bore et du manganèse. L'acide chlorhydrique modifie peu le pH des éluats (7,3 - 7,1 - 7,1 - 7,0 et 6,8 respectivement pour les cinq fractions). ainsi ce sol calcaire a un effet tampon important sur le pH de l'éluat.

L'extraction la plus importante est au premier prélèvement (elle représente 19,6 µg/g sur 30,5 µg/g de quantité totale extrait dans le cas du blanc ou 64,3%), elle décroît fortement ensuite jusqu'à la

troisième fraction (excepté dans le cas d'ajout du bore et du manganèse) pour tendre vers une extraction constante et négligeable ensuite, ce qui suppose l'arrivée à une forme de manganèse fortement retenue par le complexe adsorbant du sol. Le phénomène est un peu différent lors d'apport du bore et du manganèse. La quantité de manganèse extrait par cet éluant par rapport au manganèse total est donnée dans le tableau. 27

3.3.3. L'élution du manganèse du sol peu évolué sur alluvion.

La figure 26 décrit l'extraction du manganèse dans les différents traitements et en fonction du bore et du manganèse apportés. Il ressort que l'élution à l'eau est encore négligeable comme dans les autres sols (<0,5 % du manganèse ajouté).

Le DTPA 0,005 M se montre également le plus efficace pour extraire beaucoup plus que le manganèse ajouté. La figure 26 nous montre une faible élution du manganèse au premier prélèvement qui augmente et passe par un maximum: au deuxième prélèvement dans le cas du blanc et en présence d'un apport du bore, et au troisième prélèvement dans les autres traitements; elle décroît ensuite et surtout au cinquième prélèvement. Au total l'élution du manganèse au DTPA représente les pourcentages donnés dans le tableau 27 par rapport au manganèse total (tableau 25, chapitre IV). Ainsi nous voyons que l'apport de bore diminue l'extraction de manganèse. Cependant bien que ce sol soit le plus riche en manganèse total, il est le plus pauvre en manganèse extractible par le DTPA, ceci est probablement dû: à son pH élevé (8,5), à sa richesse en fraction argileuse et limoneuse et à sa très mauvaise structure qui, en se colmatant ne favorise pas la percolation et la compétition d'adsorption sur les sites d'échange de ce sol.

La percolation à l'acide chlorhydrique 0,1 N est moins importante que celle au DTPA 0,005 M, le manganèse extrait est plus faible, il atteint son maximum très vite, dès le premier prélèvement puis décroît pour arriver à une extraction faible et sensiblement constante ensuite (3e 4e et 5e prélèvement), sauf en cas d'apport du bore ou du bore et du manganèse ou cette extraction faible a lieu à partir du troisième prélèvement. Nous soulignons que le pH des éluats reste pratiquements constant (7,3 à 7,1). Cet éluant dissout au total les pourcentages regroupés dans le tableau 27. Les chiffres montrent que l'extraction du manganèse dissout par l'acide chlorydrique 0,1 N dans les différents traitements sont quantitativement semblables ce qui entraîne une dispari-

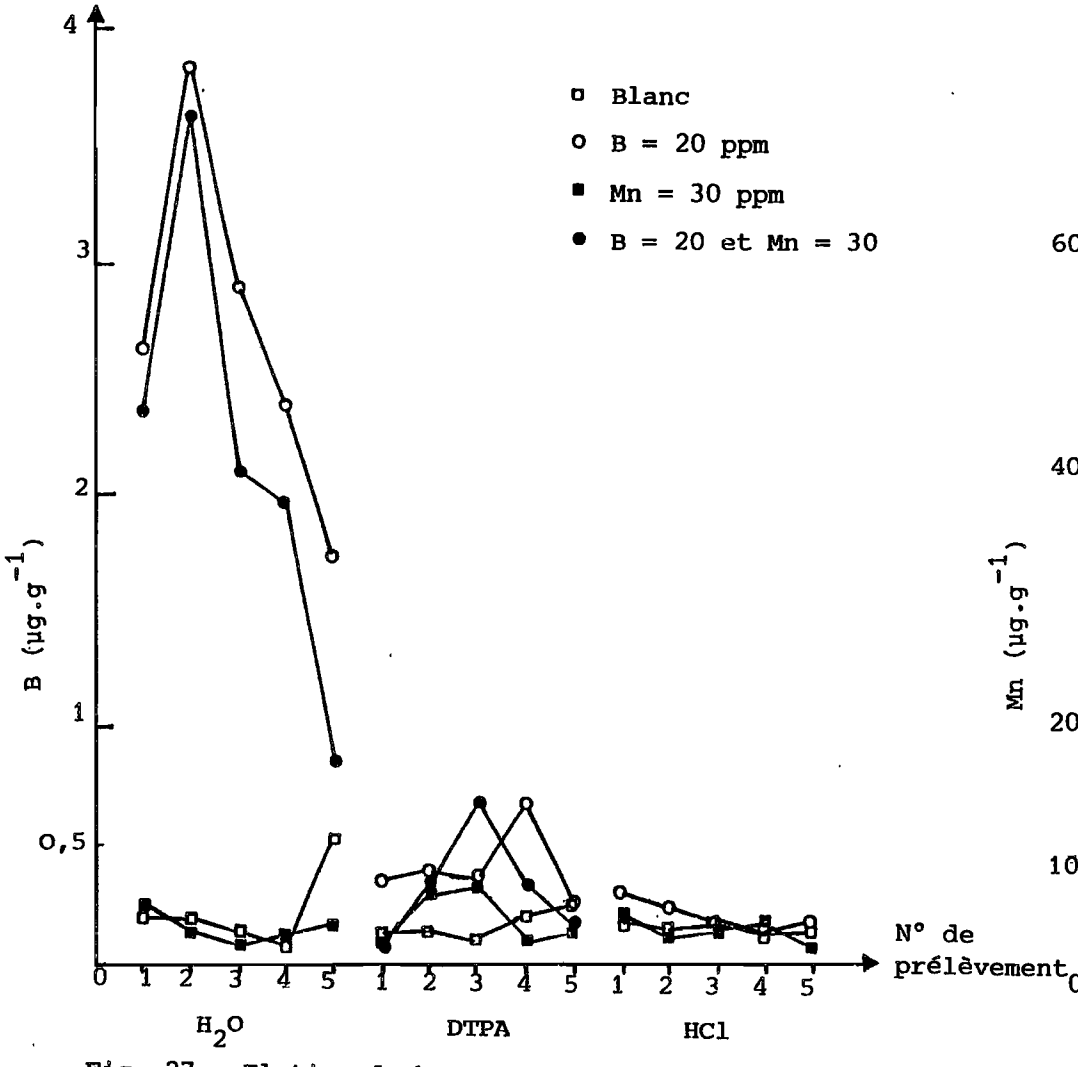


Fig. 27 - Elution du bore du sol sur limon par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

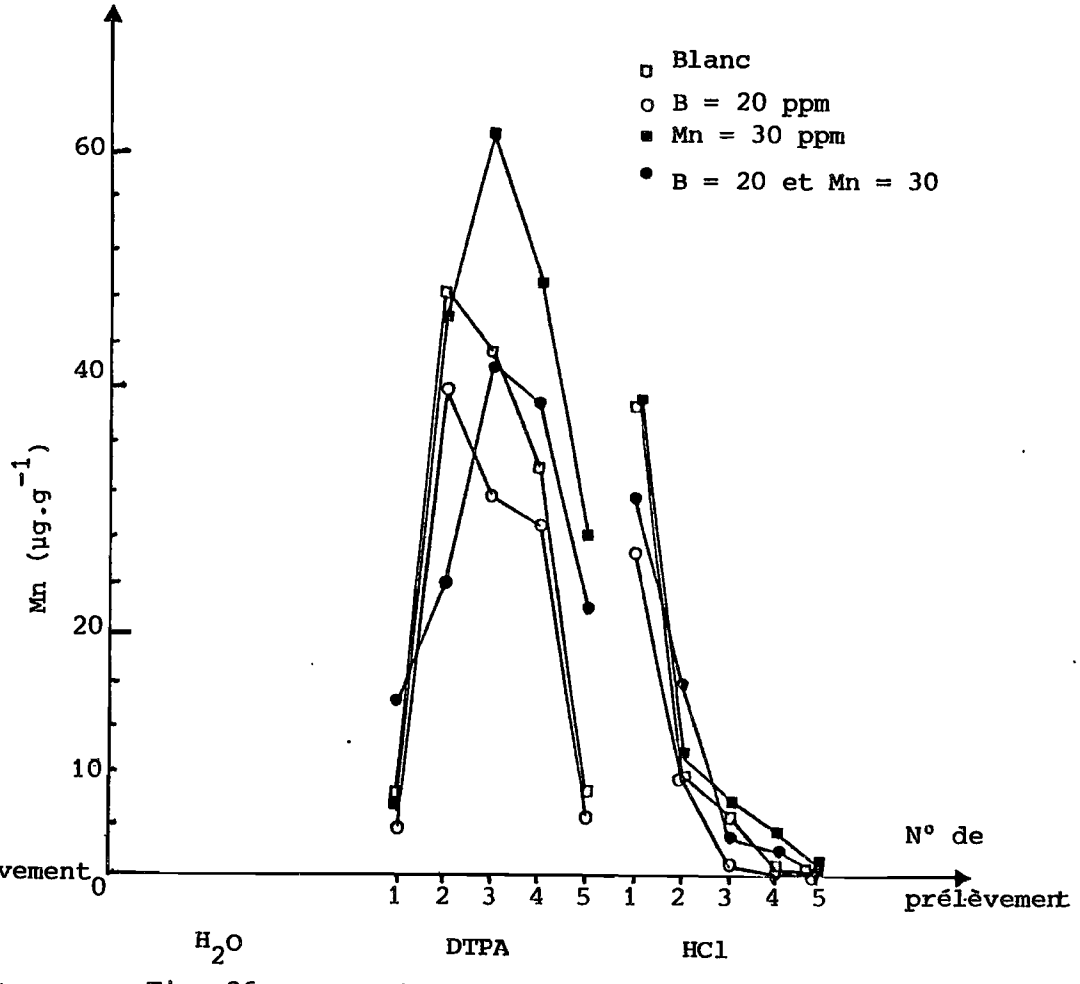


Fig. 26 - Manganèse élué du sol sur alluvion par élution de différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

tion de l'effet des éléments ajoutés. On peut donc retenir l'hypothèse d'une extraction complète du manganèse et du bore apportés pendant l'élution au DTPA.

V - 3.4. L'élution du bore.

3.4.1. L'élution du bore du sol brun lessivé sur limon.

La figure 27 montre le bore élué du sol sur limon par les différents éluants. Le bore est plus élué par l'eau que par le DTPA et encore plus que par le Hcl (tableau 28), Il ressort que le bore élué à l'eau en cas du blanc représente à la fin de l'élution un pourcentage peu élevé par rapport au bore total. En cas d'apport du manganèse ce pourcentage est encore plus faible. Le bore élué en cas d'ajout de 20ppm du bore, étant beaucoup plus important, nous pouvons déduire que la différence vient du bore ajouté dont une partie importante n'est pas fortement retenue par le sol et reste soluble à l'eau, sans être catégorique sur la nature du bore extrait dans ce cas là, nous pouvons relier cette quantité du bore élué à celle ajouté ce qui représenterait 12,93 - 1,16 : 20 = 58,85 %. Cette extraction à l'eau est importante dès la première fraction, elle augmente à la deuxième pour décroître substantiellement jusqu'à la dernière fraction (voir fig. 27). Quand on ajoute le bore et le manganèse à la fois, on constate que le comportement de l'extraction de bore est semblable au cas d'apport de bore. Cependant l'ajout de manganèse avec le bore réduit le bore extrait qui devient 10,67 - 1,16 : 20 = 47,55 %.

Bien que le sol contienne une grande partie du bore ajouté et presque la totalité du bore total, l'extraction à l'eau étant faible, le DTPA 0,005 M n'extrait qu'une fraction faible de ce bore (voir tableau 28). Parmi les cinq prélèvements, c'est dans l'éluat du cinquième prélèvement qu'on trouve le maximum du bore extrait. En cas d'ajout du bore l'élution est faible au début pour atteindre un maximum au quatrième prélévement et décroître nettement au cinquième; dans les autres traitements ce maximum est atteint au deuxième ou au troisième prélèvement et ensuite une diminution aux prélèvements suivants est constatée. Le total de ces élutions par rapport au bore total est cité dans le tableau 28 .

Le pH des éluats passe de 5,7 à 7,0 pour le cinquième prélèvement.

L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1 N n'extrait qu'une faible fraction du bore retenu dans le sol. Bien que le pH de l'éluat baisse de façon significative (2,4 pour le cinquième prélèvement), cela ne semble pas accroître le bore extractible par Hcl. Le bore de cette phase semble fixé dans des complexes minéraux connus pour leur stabilité élevée.

Le pourcentage d'élution du bore à l'acide chlorhydrique (tableau 28) et la figure 27 montrent qu'en cas d'apport du bore la quantité extrait n'est pas significativement plus élevée que celle en cas du blanc ce qui laisse supposer une forte rétention du bore ajouté.

3.4.2. L'élution du bore du sol de rendzine.

Les résultats de cet essai sont donnés par les courbes de la figure 28 et le tableau 28, ils montrent que l'élution à l'eau, bien qu'elle soit la plus importante, n'extrait qu'une faible partie de bore du sol. En cas d'ajout du bore (20ppm), l'eau solubilise au total seulement la moitié du bore ajouté (11,70 - 9,69 ÷ 20 = 55,3%) Cette solubilisation, selon la figure 28, augmente pour atteindre un maximum au troisième prélèvement puis décroît au quatrième pour remonter légèrement pour le dernier prélèvement. La solubilisation du bore apparait légérement diminuée par l'ajout de manganèse lorsqu'il est ajouté avec le bore (9,63 - 0,69 ÷ 20 = 44,69% du bore ajouté). Cette solubilisation est maximale au deuxième prélèvement puis elle décroît : substantiellement au troisième prélèvement, légèrement au quatrième et de nouveau fortement au cinquième prélèvement. Les résultats montrent que le bore soluble à l'eau est moins important dans ce sol que dans celui du sol sur limon.

L'élution au DTPA 0,005M ne modifie pas le pH des éluats et le bore extrait est moins important; dans le cas du blanc il augmente jusqu'à la dernière fraction, en cas d'apport du manganèse le bore extrait suit le même comportement que celui extrait dans le cas précédent. En cas d'apport de 20ppm de bore l'extraction est plus importante (voir tableau 28), le bore est solubilisé principalemnt au premier prélèvement ensuite il baisse pour se stabiliser au troisième et quatrième prélévements, il décroît pour le cinquième prélèvement. Enfin en cas d'ajout simultané du bore et du manganèse la solubilisation est pratiquement stable pendant les cinq prélèvements (voir fig. 28), elle est sensiblement voisine de celle en cas d'ajout du bore seul (voir tableau 28).

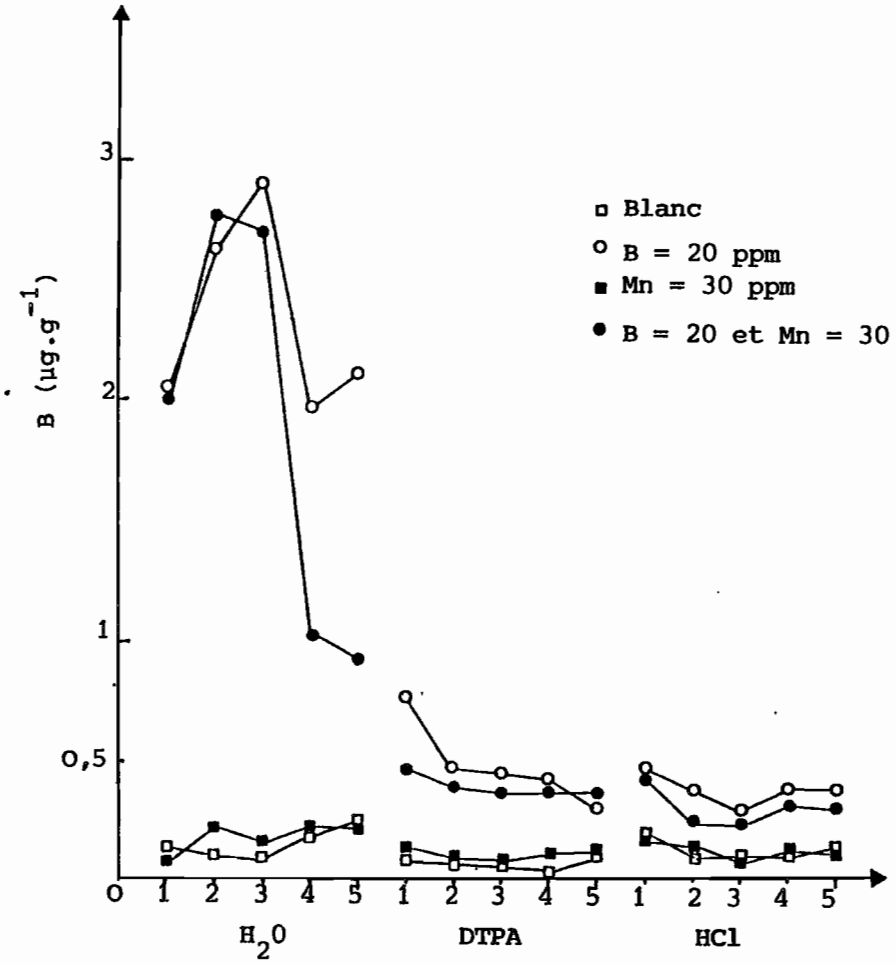


Fig. 28 - Elution du bore du sol de rendzine par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

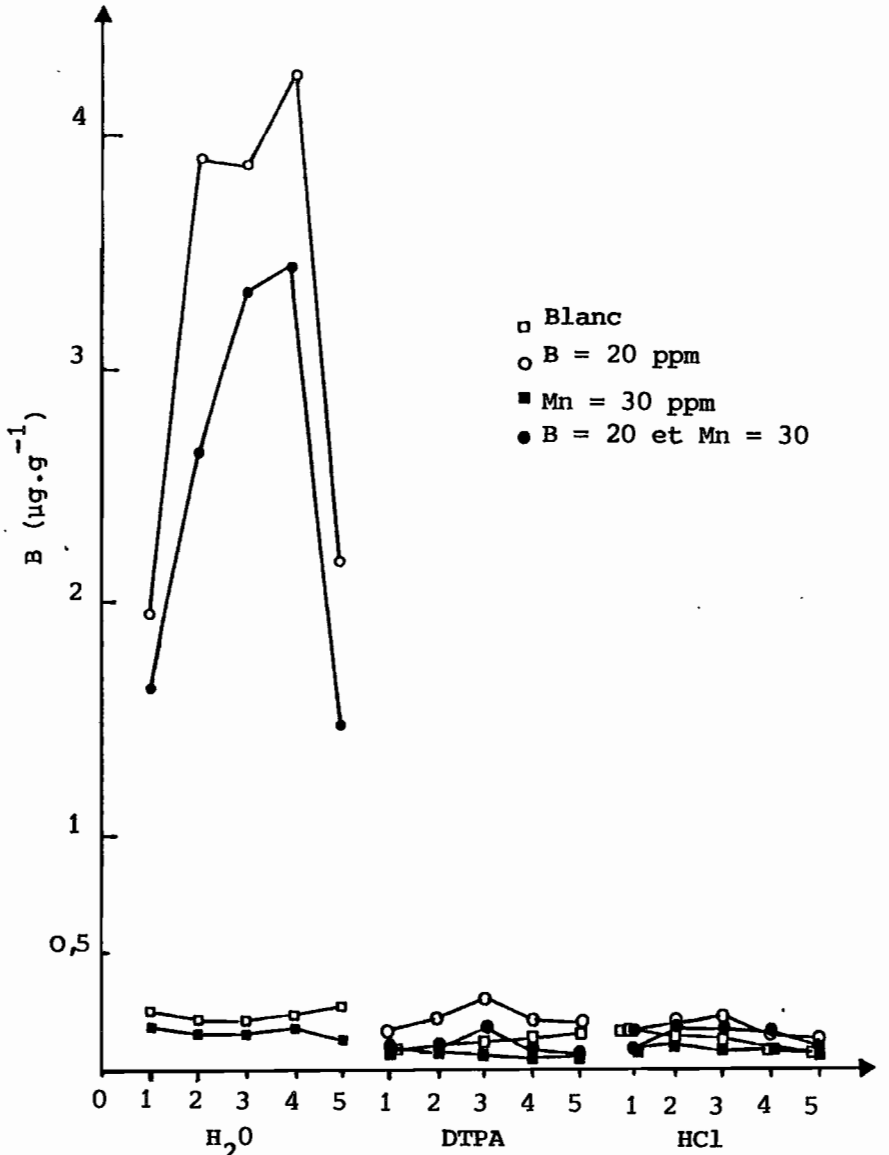


Fig. 29 - Elution du bore du sol sur alluvion par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

Ainsi on constate comme dans le cas du sol sur limon que l'apport du manganèse avec le bore n'a pas d'influence sur la solubilisation de ce dernier.

L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N du bore de ce sol est plus importante que dans les cas des deux autres sols, elle est voisine de celle au DTPA. L'extraction du bore est presque identique dans le cas du blanc et avec apport du manganèse (voir fig.28 et le tableau 28). En présence d'apport du bore seul l'élution est plus importante qu'en présence de 30ppm de manganèse.

3.4.3. L'élution du bore du sol peu évolué sur alluvion.

La figure 29 montre l'élution du bore par les différents éluants en fonction des traitements apportés. Nous constatons que le bore ajouté est le plus solubilisé à l'eau qu'aux deux autres.
Dans le cas du blanc la solubilisation est pratiquement constante pendant les cinq prélèvements; elle l'est également en cas d'apport de manganèse à l'exception d'une baisse au dernier prélèvement, dans les deux cas la totalité de bore solubilisé par rapport au bore total est consignée dans le tableau 28. Ce tableau montre que cette solubilisation est beaucoup plus importante en cas d'ajout du bore; cette différence vient de la solubilisation du bore ajouté, elle représente 72,9 % de l'ajout. On peut donc conclure que le bore ajouté est moins retenu sur ce sol que sur les deux autres. En cas d'apport de manganèse (30ppm) et de bore (20ppm) à la fois, le bore solubilisé est moins important (55,4% du bore ajouté) que dans le cas précédent, ce résultat montre que le manganèse a un effet positif sur la rétention du bore dans le sol. Le comportement de l'élution du bore est semblable en cas d'apport du bore et en cas d'apport de bore et de manganèse à la fois : la quantité éluée augmente jusqu'au quatrième prélèvement pour décroître brutalement ensuite.

L'élution du bore au DTPA 0,005M est moins importante dans les trois sols; elle augmente jusqu'à la dernière fraction dans le cas du blanc (un total de 0,89 % de bore total). En présence d'apport du manganèse, après une légère baisse au deuxième prélévement elle se stabilise jusqu'à la fin (voir fig.29 et tableau 28).

La solubilisation du bore en cas d'apport du bore seul ou en présence de manganèse augmente jusqu'à la troisième fraction pour décroître

jusqu'à la cinquième fraction (voir fig. 29 et tableau 28).

L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N est moins importante que celle au DTPA ; nous avons constaté que l'acide chlorhydrique élué ne modifie pratiquement pas le pH des éluants des cinq prélévements (respectivement 7,4 - 7,2 - 7,0 - 7,0 et7,0; ceci peut être dû en partie à la teneur élevée en calcaire de ce sol (24,2 %) qui neutralise l'effet de l'acide chlorhydrique; ce sol a un pouvoir tampon important. Les différences entre les divers traitements de bore ne sont pas importantes, le bore élué au cours des cinq prélèvements est donné dans la tableau 28.

V - 4 - *EXPERIENCE AVEC ^{54} Mn.*

Dans cette expérience 30 µci de ^{54}Mn radioactif (période demi vue de 284 jours) sont injectés dans chaque colonne à l'exception des blancs qui n'ont pas reçu de manganèse. C'est par rapport à ces 30 µci de ^{54}Mn désignés sous le nom de radioactivité introduite (R.I.) que le manganèse élué sera calculé. Nous suivons la rétention du manganèse dans les colonnes en fonction de la hauteur, en mesurant la radioactivité à l'aide d'un appareil de contrôle (BABYLINE).

Pour étudier l'effet du manganèse et du bore sur la rétention et la mobilisation des éléments majeurs et vice-versa nous avons dosé le calcium, le potassium et le magnésium dont nous en donnons les résultats ci-dessous :

4.1. Elution du calcium.

Les résultats de l'élution du calcium sont donnés par les figures 30, 31 et 32. Il ressort que le calcium élué par l'eau est très faible, la fraction solubilisée est en relation avec le pH indépendemment du calcium total des sols; le tableau 29 montre que c'est dans le cas du sol sur alluvion ou le pH est le plus élevé (8,5) et malgré sa teneur élevé en calcium total que l'eau extrait le moins du calcium;quant au sol sur limon (pH = 6,3) l'eau extrait plus du calcium malgré qu'il soit le plus pauvre en calcium total. Dans le cas du sol de rendzine qui est le plus riche en calcium total avec un pH intermédiaire des deux autres sols (7,9) par rapport aux précédents, l'eau solubilise en cas du blanc une quantité intermédiaire.

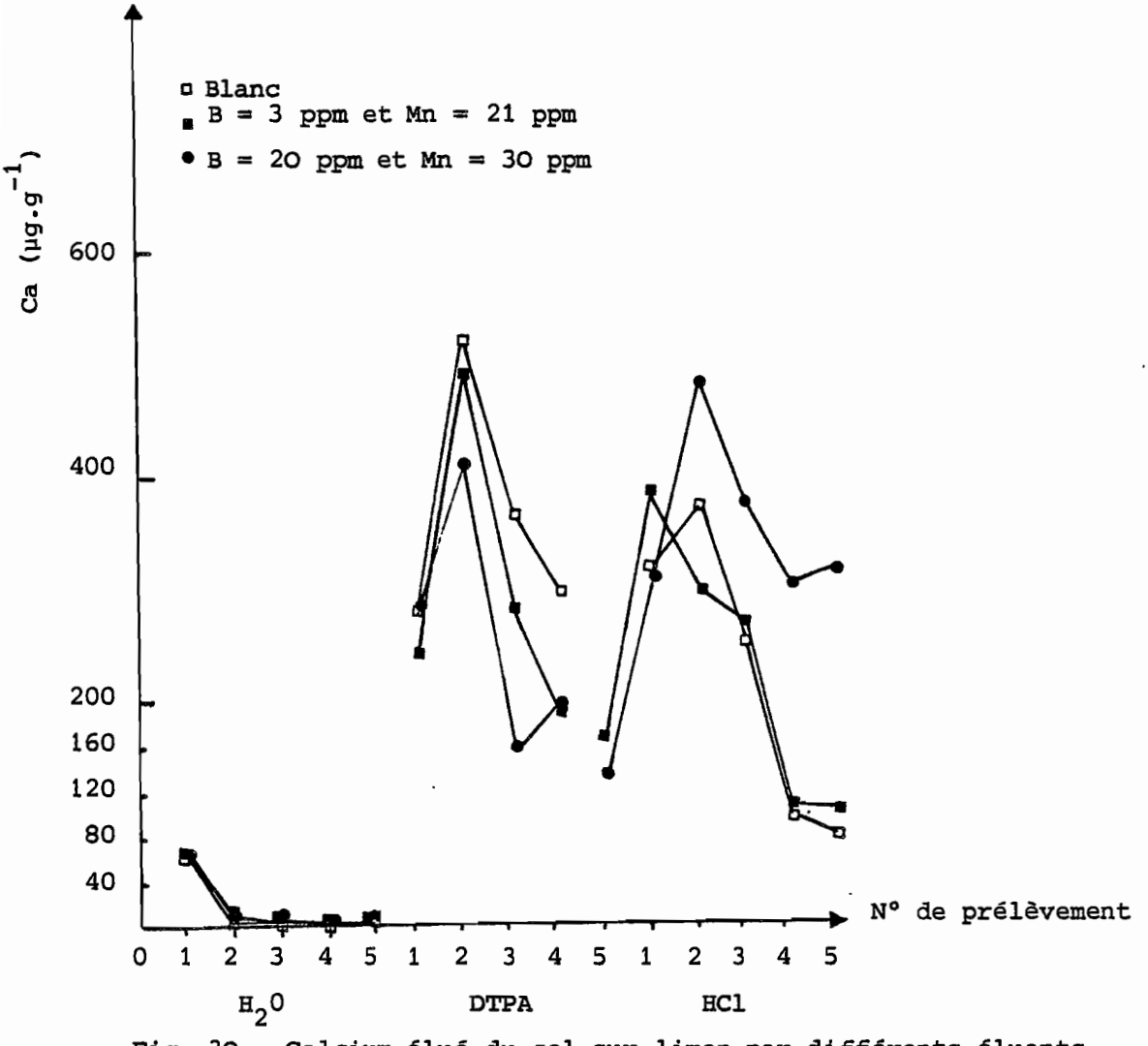


Fig. 30 - Calcium élué du sol sur limon par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

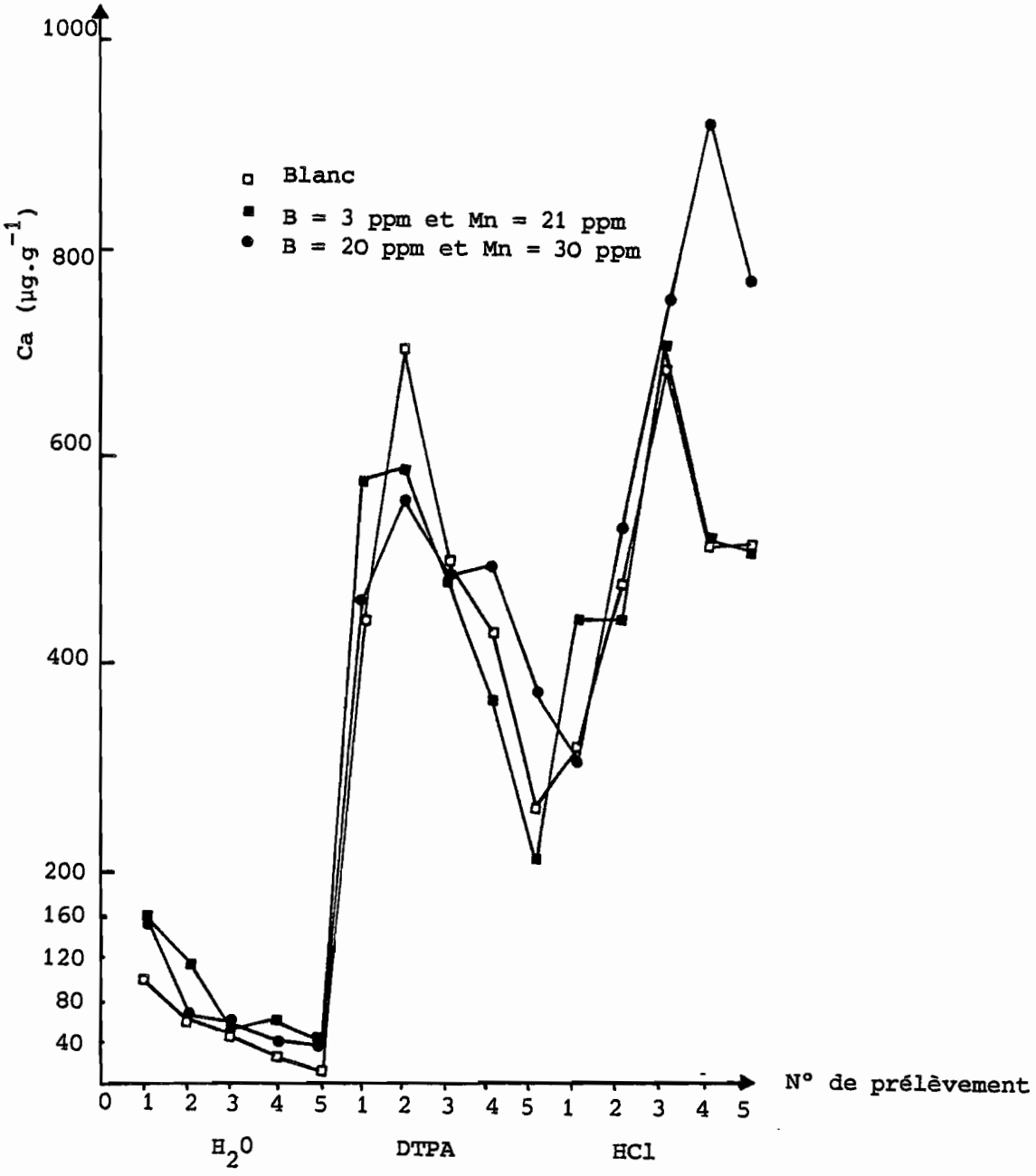


Fig. 31 - Calcium élué du sol de rendzine par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

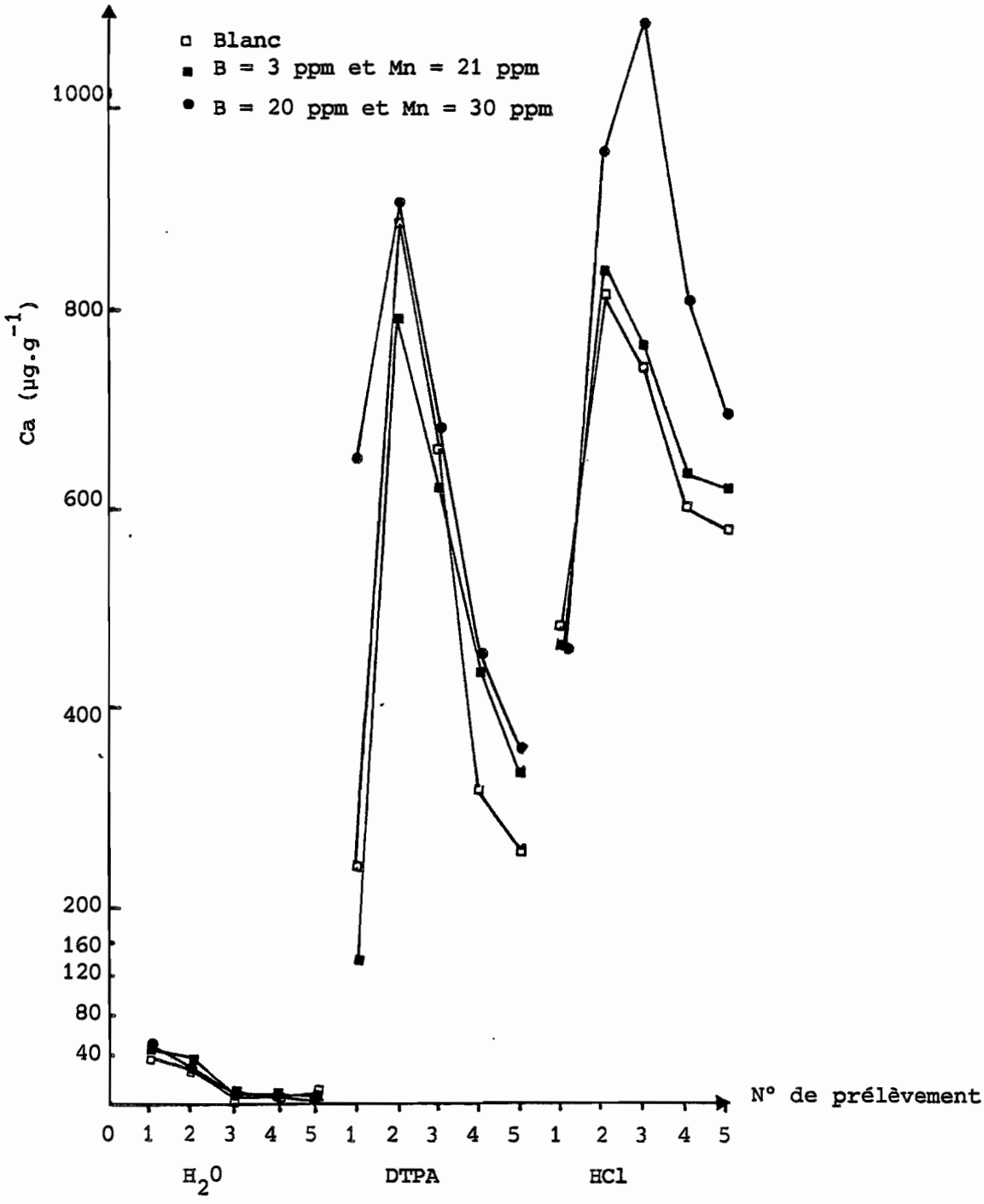


Fig. 32 - Calcium élué du sol sur alluvion par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

L'ajout de bore et de manganèse a peu d'effet dans le cas du sol sur limon et du sol sur alluvion où la quantité du calcaire élué est proche de celle du blanc, tandis que sur sol de rendzine ces apports semblent augmenter la quantité du calcium éluée (voir fig.32 et tableau 29). L'élution du calcium au DTPA 0,005 M à PH 7,3 est pour les trois sols beaucoup plus importante que à l'eau. En cas du blanc (sans ajout ni de B ni de Mn) et comme le montrent les fig.30,31 et 32 on constate que le DTPA élué plus du calcium du sol sur alluvion que des autres sols. Les quantités de calcium éluées sont rapportées dans le tableau 29 en pourcentage du calcium total des sols. Ainsi il est nettement montré que le DTPA, comme dans le cas d'élution à l'eau, élue beaucoup plus de calcium du sol sur limon que des autres sols ce qui laisse supposer (compte tenu des caractéristiques des sols) que c'est le pH du sol qui joue un rôle primondial dans la solubilisation de cet élément.
L'élution du calcium des colonnes des "blancs" atteint son maximum au deuxième prélèvement pour les trois sols pour décroître substantiellement jusqu'au cinquième prélèvement. Quant on ajoute 21ppm de manganèse et 3ppm de bore nous remarquons que cet apport, même si l'élution inter et intra-prélèvements est différente (voir fig.30, 31 et 32), n'a pas d'effet sur l'élution totale du calcium par rapport à celle du "blanc" voir tableau 29).

L'élution du calcium à l'acide chlorhydrique 0,1N est différente: l'ajout de 20ppm de bore et de 30ppm de manganèse joue un rôle positif sur l'élution du calcium (voir tableau 29). Ce rôle est commun pour les trois sols mais il est moins important en cas de sol sur alluvion (voir fig. 30, 31 et 32 et tableau 29).

Tableau 29 - Elution du calcium (en % de Ca total) des sols étudiés aux différents réactifs.

Elément ajouté (ppm)	Ca/H20			Ca/DTPA			Ca/Hcl.		
	S.L.	S.R.	S.A.	S.L.	S.R	S.A	S.L	S.A	S.A
Blanc	0,41	0,14	0,08	9,0	1,6	1,8	6,6	1,8	2,5
B=3 et Mn = 21	0,48	0,31	0,09	8,1	1,5	1,8	6,8	1,8	2,5
B=20 et Mn = 30	0,46	0,25	0,09	7,0	1,6	2,4	10,6	2,2	3,1

Pour la légende se reporter au tableau 38

Par contre l'ajout de 21ppm de manganèse et seulement de 3ppm de bore n'affecte visiblement pas la solubilisation du calcium à l'acide chlorhydrique.

4.2. Elution du potassium.

Les figures 33, 34 et 35 montrent les résultats de l'élution du potassium. Nous constatons que l'élution de cet élément à l'eau est nettement moins importante par rapport à l'élution aux autres éluants. Pour les trois sols et les trois traitements l'élution à l'eau est maximale au premier prélèvement, elle décroît ensuite progressivement jusqu'au dernier; la décroissance est moins nette en cas du sol sur alluvions. Les pourcentages de potassium total élué à l'eau pour les trois sols sont rapportés au tableau 30. En cas d'élution à l'eau, l'ajout du bore et du manganèse n'a pas d'effet sur la quantité totale de potassium éluée (voir tableau 30).

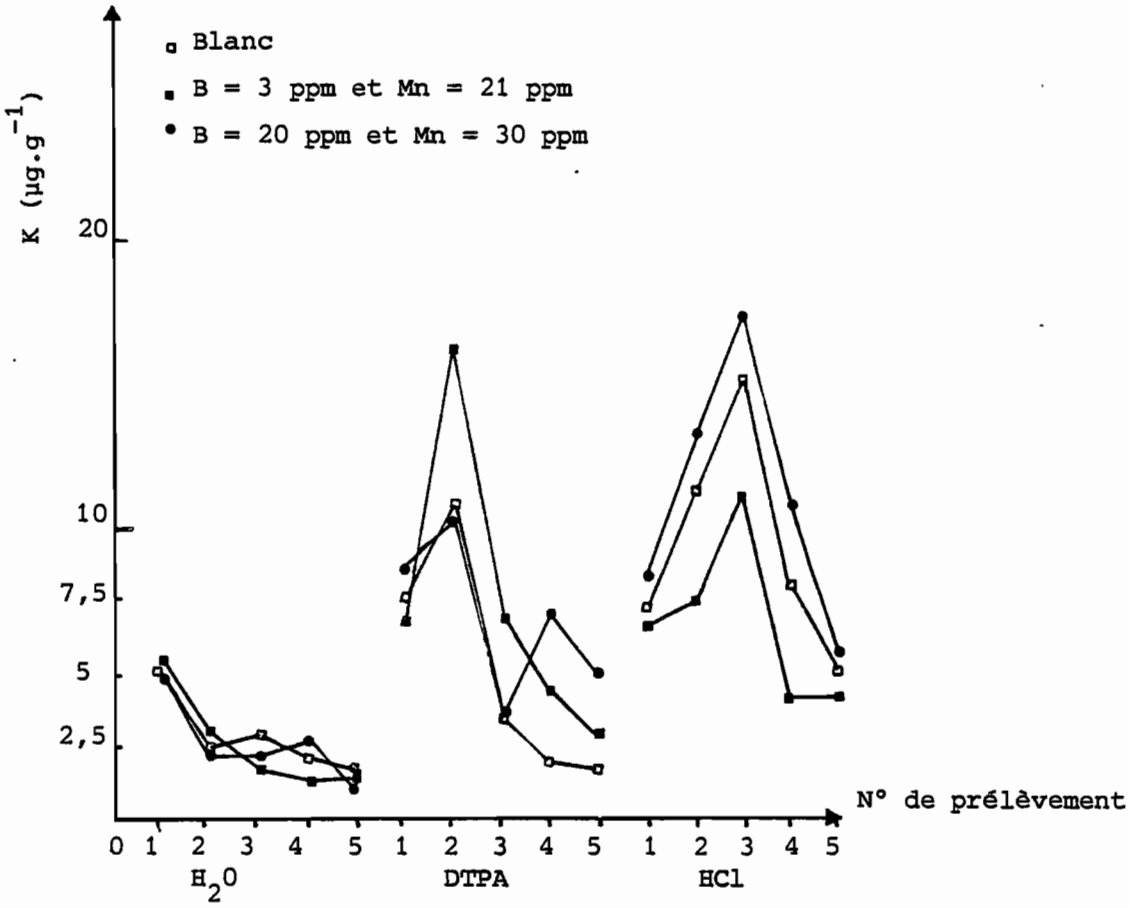


Fig. 33 - Potassium élué du sol sur limon par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

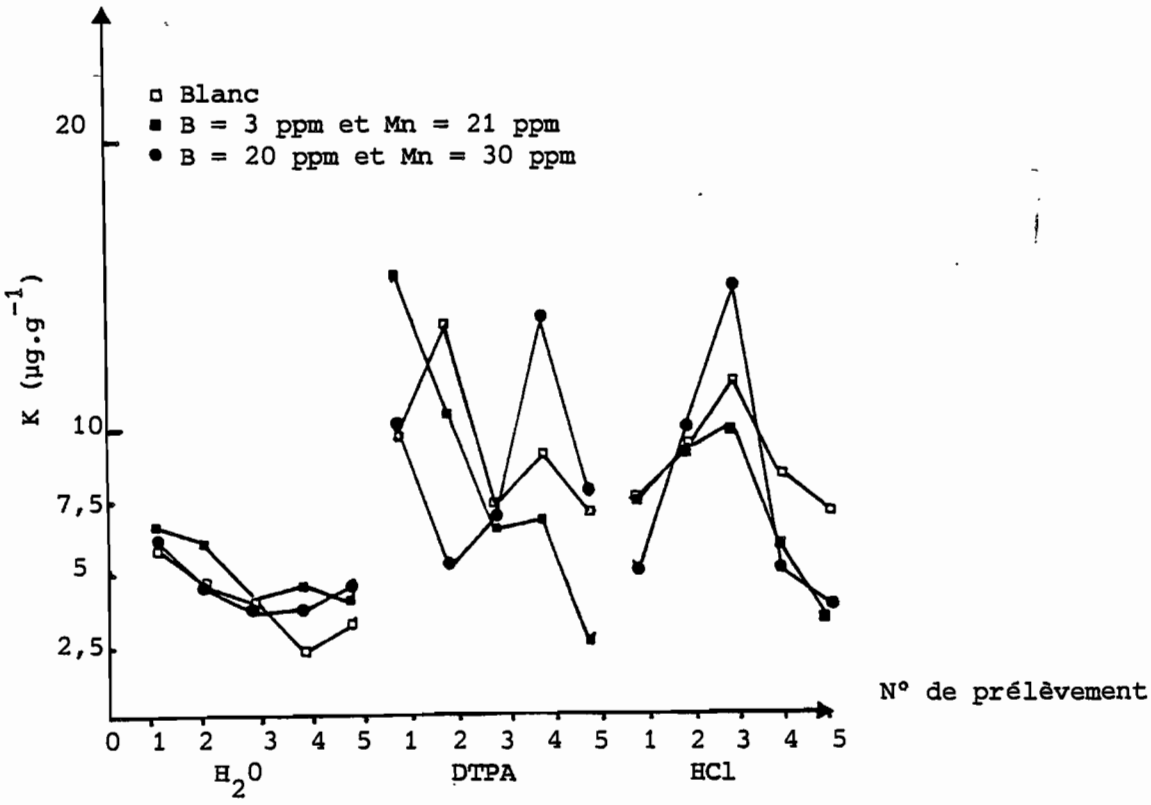


Fig. 34 - Potassium élué du sol de rendzine par différents éluants en fonction du bore et du manganèse apportés.

Tableau 30 - Elution du potassium (en % de K total) des sols étudiés aux différents réactifs.

Elément ajouté (ppm)	K/H20			K/DTPA			K/Hcl		
	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A
Blanc	0,43	0,72	0,34	0,75	1,7	1,3	1,3	1,6	1,9
B=3 et Mn = 21	0,39	0,97	0,35	1,0	1,5	1,3	1,0	1,3	2,0
B=20 et Mn = 30	0,38	0,82	0,34	1,1	1,6	1,4	1,7	1,4	1,7

Pour la légende se rapporter au tableau 28.

Comme les figures 33, 34 et 35 montrent, l'élution de potassium au DTPA 0,005M est plus importante, cette élution atteint un maximum pour le deuxième prélèvement pour décroître ensuite. En potassium extractible au DTPA les sols se différencient nettement (voir tableau 30).
Le fait que le sol de rendzine ait le plus de potassium extractible au DTPA (par rapport à son potassium total) ne signifie pas que ce dernier soit le plus important en valeur absolue. En réalité le DTPA extrait en valeur absolue le plus de potassium du sol sur alluvion

(71,49 ppm contre 44,64 ppm en cas du sol de rendzine et contre 24,16 ppm en cas du sol sur limon). En cas d'ajout du manganèse et du bore le DTPA dans l'ensemble n'extrait pas plus de potassium excepté pour le sol sur limon ou ces ajouts semblent jouer un effet favorable (voir tableau 30).

Le potassium extractible par l'acide chlorhydrique 0,1 N varie d'un sol à l'autre (fig. 33, 34 et 35); dans le cas du sol sur alluvion le potassium extrait est plus important que ceux du sol sur limon et du sol de rendzine (voir tableau 30).

Les différents apports de bore et de manganèse, comme dans le cas d'élution au DTPA, ne semblent pas avoir d'effet important sauf dans le cas du sol sur limon où l'ajout de 20ppm de bore et de 30ppm de manga-

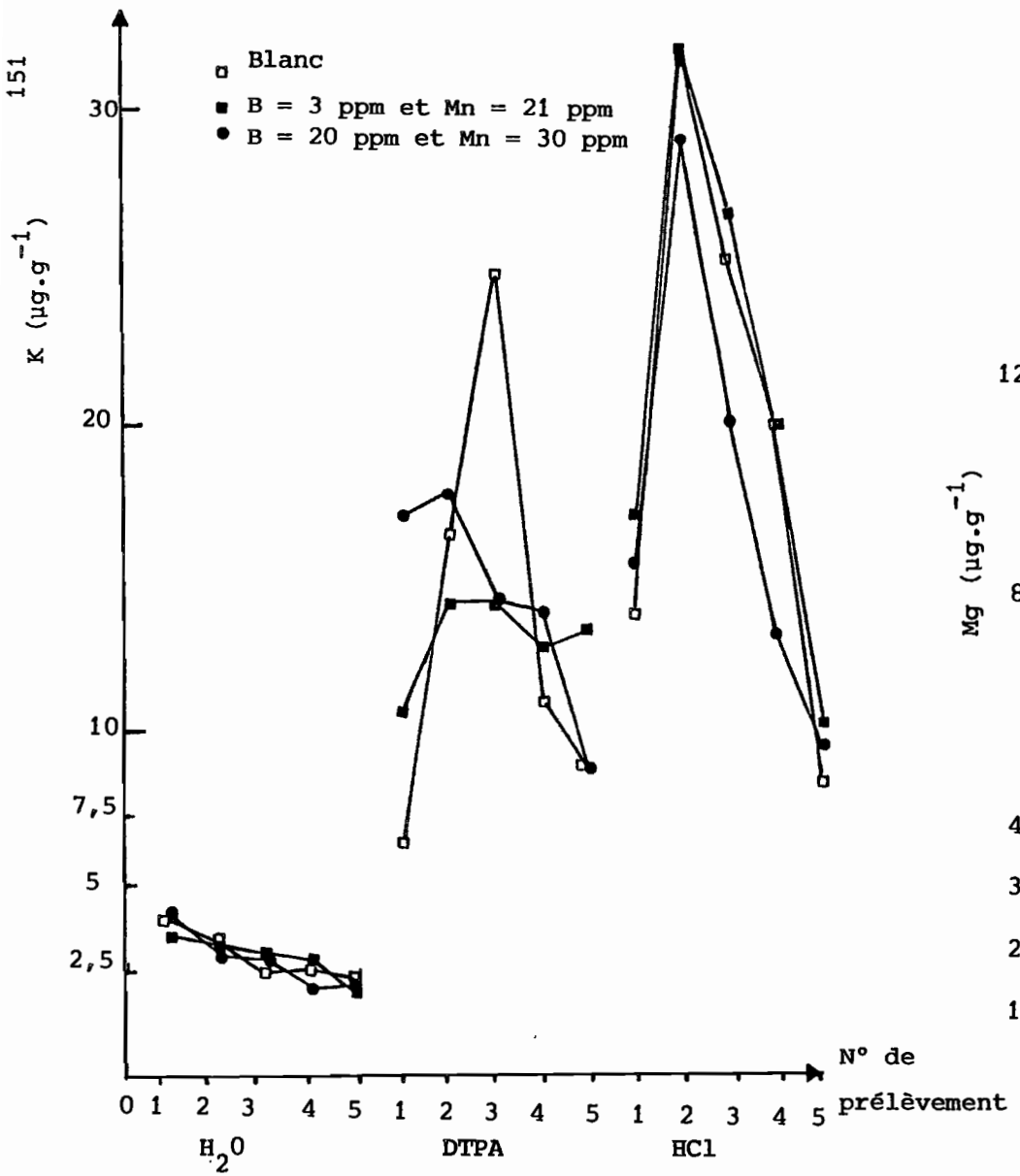


Fig. 35 - Potassium élué du sol sur alluvion par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

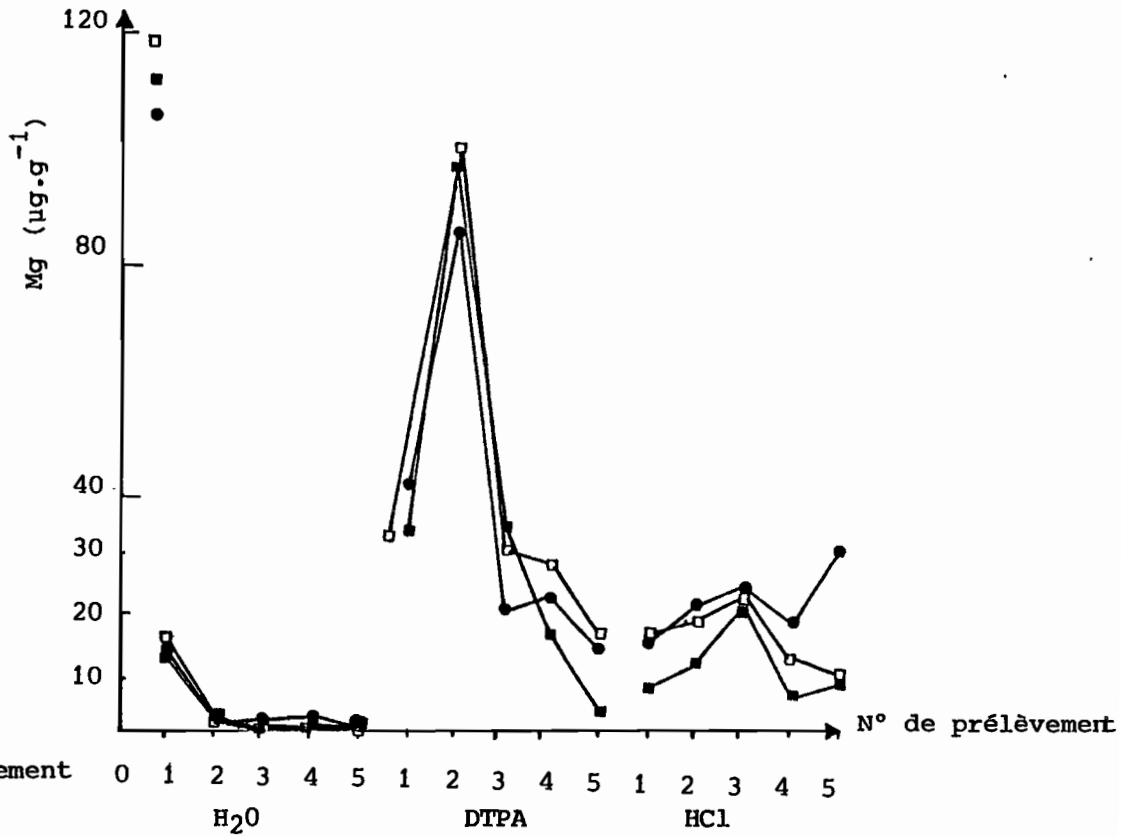


Fig. 36 - Magnésium élué du sol sur limon par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

nèse favorise l"extraction du potassium par l'acide chlorhydrique,0,1N (voir tableau 30).

4.3. Elution du magnésium.

Les figures 36, 38 et 38 illustrent les résultats obtenus pour l'élution du magnésium; l'élution à l'eau est moins importante que celles aux autres éluants; parmi les trois sols c'est du sol de rendzine que l'eau extrait le plus de magnésium (98,4ppm). Ce sol contient moins de magnésium total que le sol sur alluvion tandis que le sol sur limon est le moins riche (voir tableau 8 chapitre II). Le magnésium extrait par élution à l'eau au bout de cinq prélèvements est donné dans le Tableau 31 en pourcentage par rapport au magnésium total du sol. Le sol sur limon malgré sa faible teneur en magnésium total se comporte comme le sol ayant le pourcentage relatif le plus élevé en magnésium extractible à l'eau. On note que l'ajout de 21ppm de manganèse et de 3ppm de bore joue un rôle positif sur l'extraction du magnésium par l'eau surtout dans le cas du sol de rendzine (+ 22,4 % par rapport au blanc), cet effet ne se retrouve pas dans le sol sur limon. Par contre l'ajout de 30ppm de manganèse et de 20ppm de bore ne semble pas avoir un effet à l'exception du sol de rendzine où cet ajout semble avoir un effet négatif sur l'extraction du magnésium par l'eau (-17,5% par rapport au blanc). La courbe d'élution à l'eau commence par un maximum pour le premier prélèvement, sauf dans le cas du sol rendzine, puis elle décroît jusqu'à la fin.

L'élution au DTPA 0,005M du magnésium varie dans son comportement selon les sols et les traitements (voir fig.36, 37 et 38).
Le tableau 31 montre la somme du magnésium extrait au DTPA par rapport au magnésium total des sols. Les chiffres montrent que c'est le sol sur limon qui présente la plus forte teneur en magnésium extractible au DTPA, ce qui pourrait expliquer un approvisionnement suffisant en magnésium des plantes malgré sa teneur totale faible en cet élément. En cas d'apport du bore et du manganèse l'extraction du magnésium ne semble pas être influencée à l'exception du sol sur alluvion où l'ajout de 30ppm de manganèse et de 20ppm du bore influence positivement l'extraction (+ 38,63% par rapport au blanc). Les figures 36, 37 et 38 montrent que l'élution au DTPA du sol sur limon passe par un maximum au deuxième prélèvement

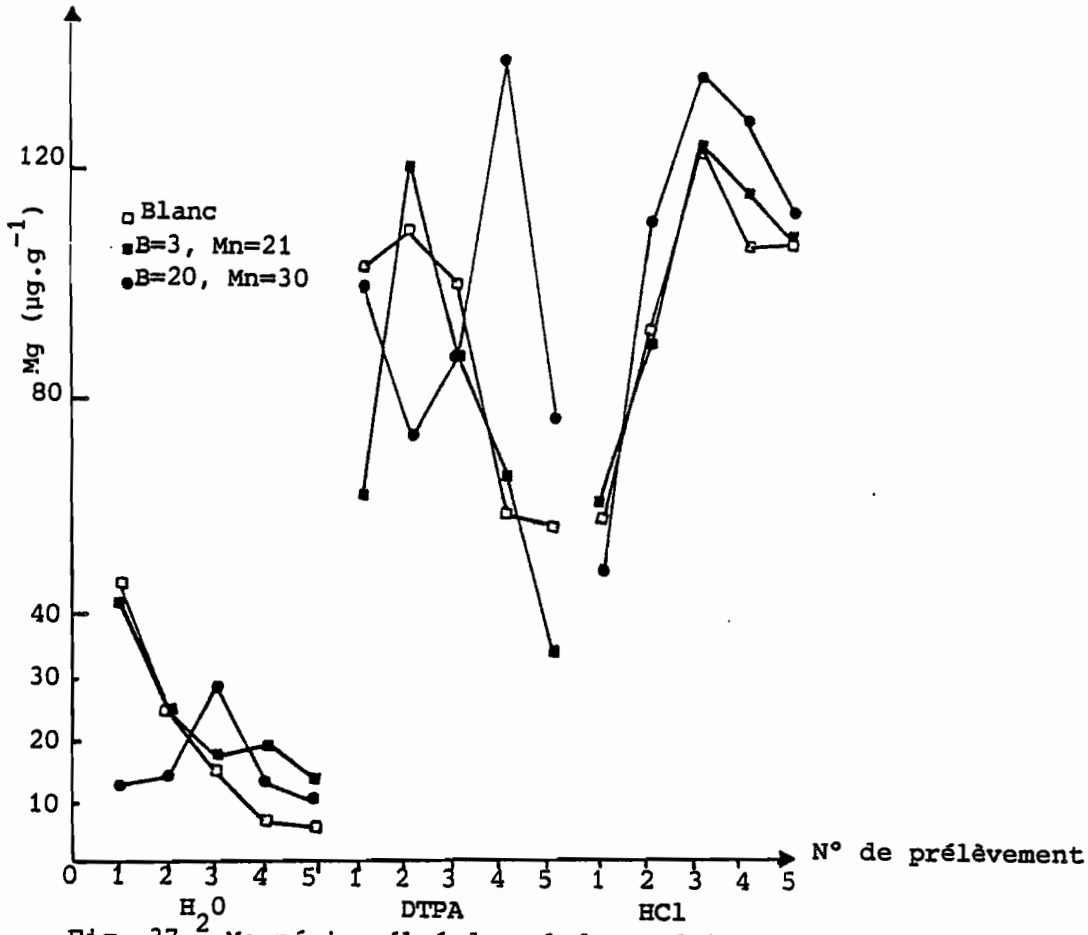


Fig. 37 - Magnésium élué du sol de rendzine par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

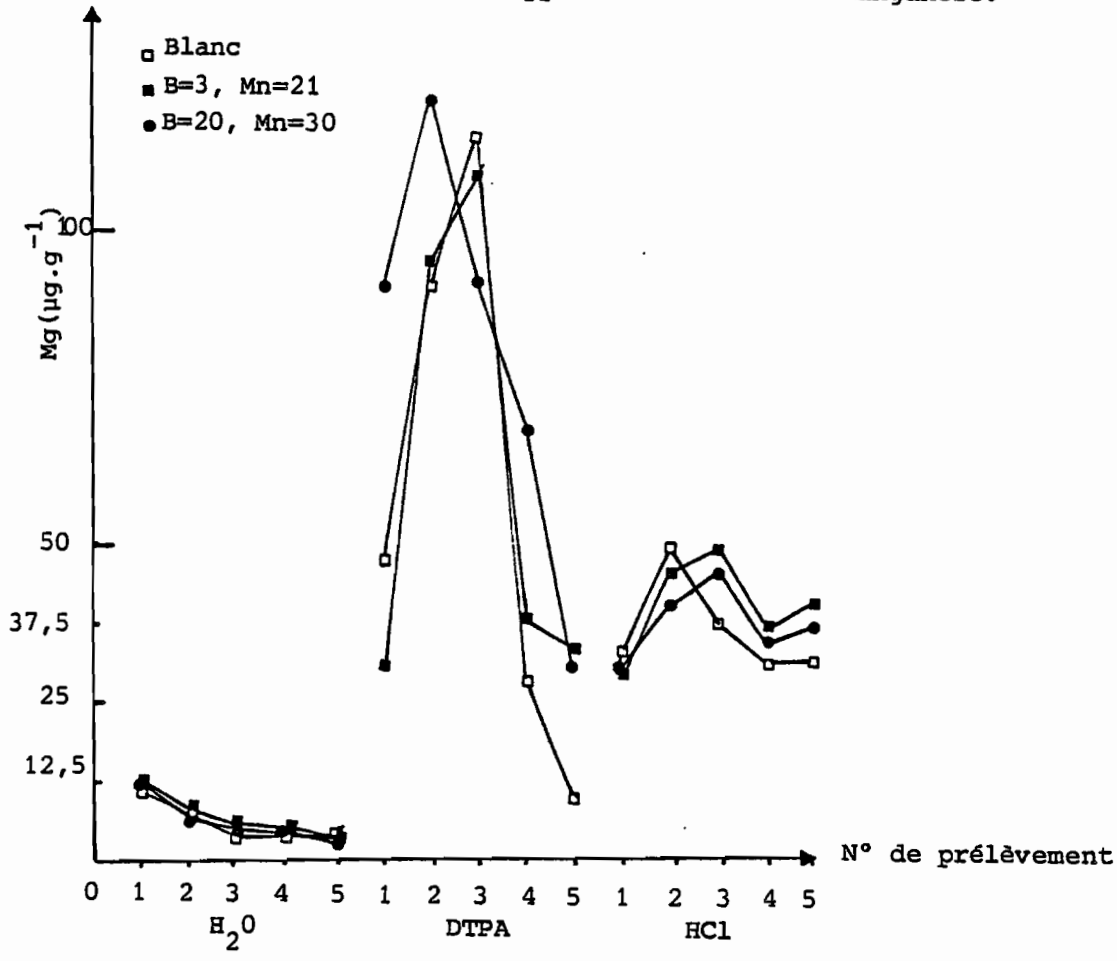


Fig. 38 - Magnésium élué du sol sur alluvion par différents éluants en relation avec l'apport du bore et du manganèse.

Tableau 31 - Elution du magnésium (en % de Mg total) des sols étudiés aux différents réactifs.

Elément ajouté (ppm)	Mg/H20			Mg/DTPA			Mg/Hcl		
	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A
Blanc	0,97	0,74	0,14	10,6	3,1	1,4	4,1	3,5	0,86
B=3 et Mn = 21	0,90	0,90	0,18	9,5	2,7	1,6	2,8	3,6	0,99
B=20 et Mn = 30	1,1	0,61	0,15	9,9	3,2	2,0	5,7	3,9	0,93

S.L. = Sol sur limon. S.R = Sol de rendzine S.A. = Sol sur alluvion.

pour décroître ensuite régulièrement jusqu'au cinquième. Il va de même pour le sol de rendzine sauf en cas d'ajout de 30ppm de manganèse et de 30ppm de bore où l'extraction n'atteint son maximum qu'au quatrième prélèvement. Pour le sol sur alluvion ce maximum est atteint également au deuxième prélèvement quand on ajoute 30ppm de manganèse et 20ppm de bore, mais il n'est atteint qu'au troisième pour les autres traitements. L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1 N du magnésium est très variable d'un sol à l'autre : à partir du sol sur limon le réactif extrait significativement moins de magnésium que le DTPA (voir tableau 31), ceci malgré la baisse notable de pH des éluats de l'acide chlorhydrique (de 5,2 à 2,8 pour le cinquième éluats) nous pensons que cela pourrait être dû à l'extraction importante du magnésium par le DTPA et à la teneur totale faible de ce sol ce qui revient à un appauvrissement par le DTPA en magnésium extractible. Pour le sol sur alluvion nous avons noté également une baisse importante du magnésium extrait par l'élution à l'acide chlorhydrique par rapport à celle du DTPA (voir tableau 31). Cependant dans ce sol le pH des éluats ne baissent pratiquement pas, en raison de la richesse de ce sol en calcaire. Pour le cas de sol de rendzine la différence de l'élution à l'acide chlorhydrique et celle au DTPA n'est pas importante bien qu'il soit plus riche que les deux autres sols.

Dans le cas du sol de rendzine et comme pour les autres éluants l'ajout du bore et du manganèse n'a pas d'effet important sur l'extraction du magnésium. Par contre en cas du sol sur limon l'ajout de 20ppm de bore et de 30ppm de manganèse a un effet favorable sur l'extraction du magnésium (voir tableau 31), tandis que cet effet n'a pas été mis en évidence sur le sol sur alluvion. L'ajout de 21ppm de manganèse et de 3ppm de bore a un effet négatif sur l'extraction de magnésium dans le cas du sol sur limon (- 31,89%, par rapport au blanc) ce qui se retrouve avec les cultures dont nous parlerons dans les autres chapitres.

4.4. Elution du bore.

Pour des raisons techniques le bore ne pouvant être dosé sur place et en conséquence nous n'avons pu le dosé que dans les éluats de l'élution à l'eau dépourvus de radioactivité. Nous donnons sur la figure 33 les résultats de l'élution du bore des trois sols. Comme dans l'expérience précédente l'eau dans le cas du blanc extrait moins de bore du sol de rendzine que des deux autres sols, ceci est en accord avec sa teneur totale, la plus faible par rapport aux deux autres. Dans ce cas du blanc, le bore extrait à l'eau représente : 1,3 % pour le sol sur alluvion, 1,3 % pour le sol sur limon et 1,2 % pour le sol de rendzine; on constate ainsi que la différence entre les sols est réduite quand on compare le bore extrait au bore total. L'extraction est presque constante durant les cinq prélèvements sur le sol sur alluvion tandis qu'il augmente vers le quatrième et surtout le cinquième prélèvement dans les deux autres sols.

En cas d'ajout de 3ppm de bore et de 21ppm de manganèse on note que l'extraction du bore ne varie pratiquement pas pour le sol sur limon tandis qu'elle augmente pour le sol de rendzine et le sol sur alluvion où une partie importante du bore ajouté est extrait (respectivement 54,43% et 50,67%); ainsi l'effet du manganèse ajouté varie d'un sol à l'autre.

En cas d'apport de 20ppm de bore et de 30ppm de manganèse, l'extraction du bore semble être peu affectée par le manganèse ajouté car dans les trois sols l'eau extrait une partie importante du bore ajouté : elle est plus importante dans le sol sur alluvion (50,85 %) que dans le sol de rendzine (40,39 %) et le sol sur limon (40,68 %).

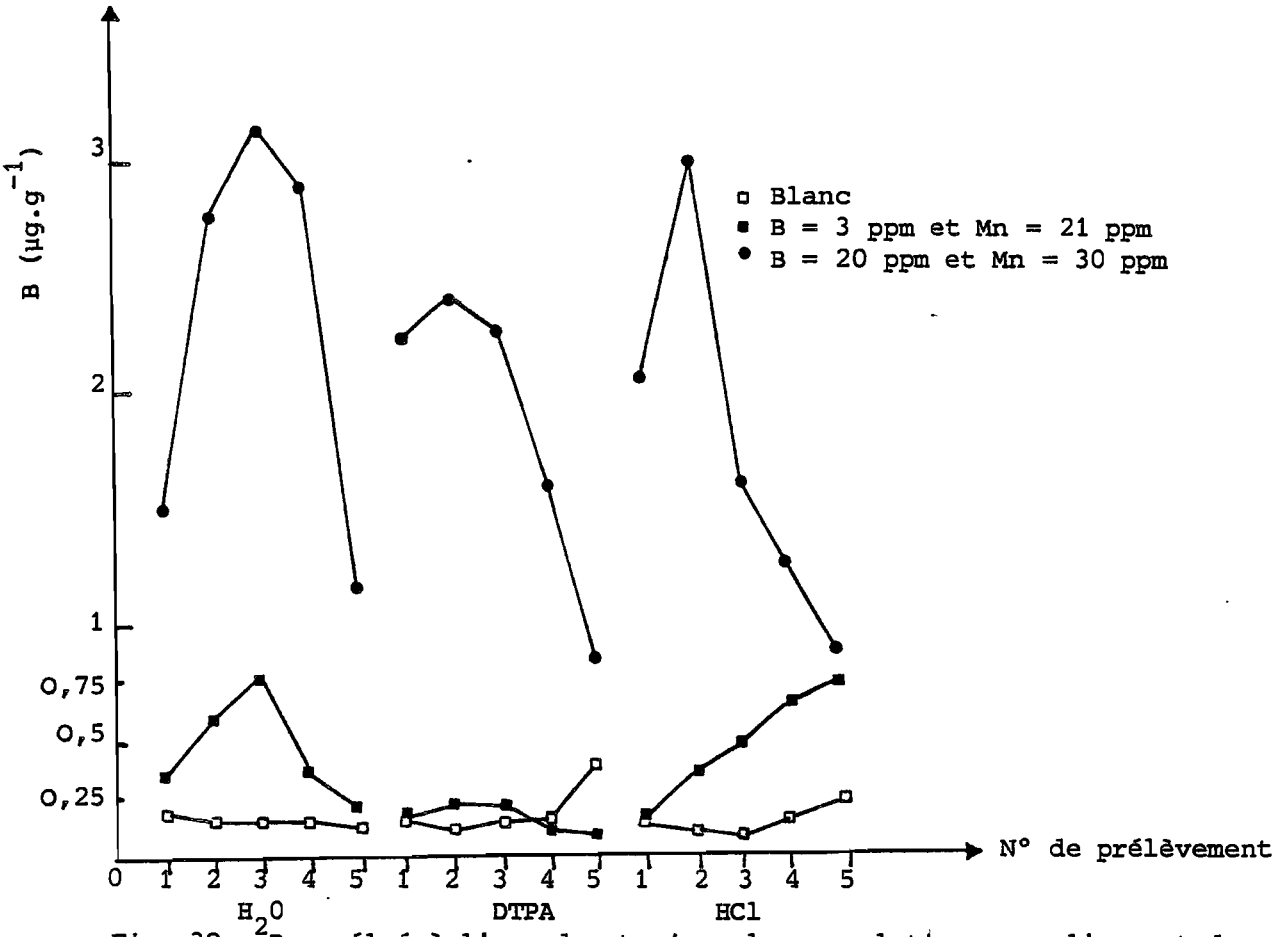


Fig. 39 - Bore élué à l'eau des trois sols en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

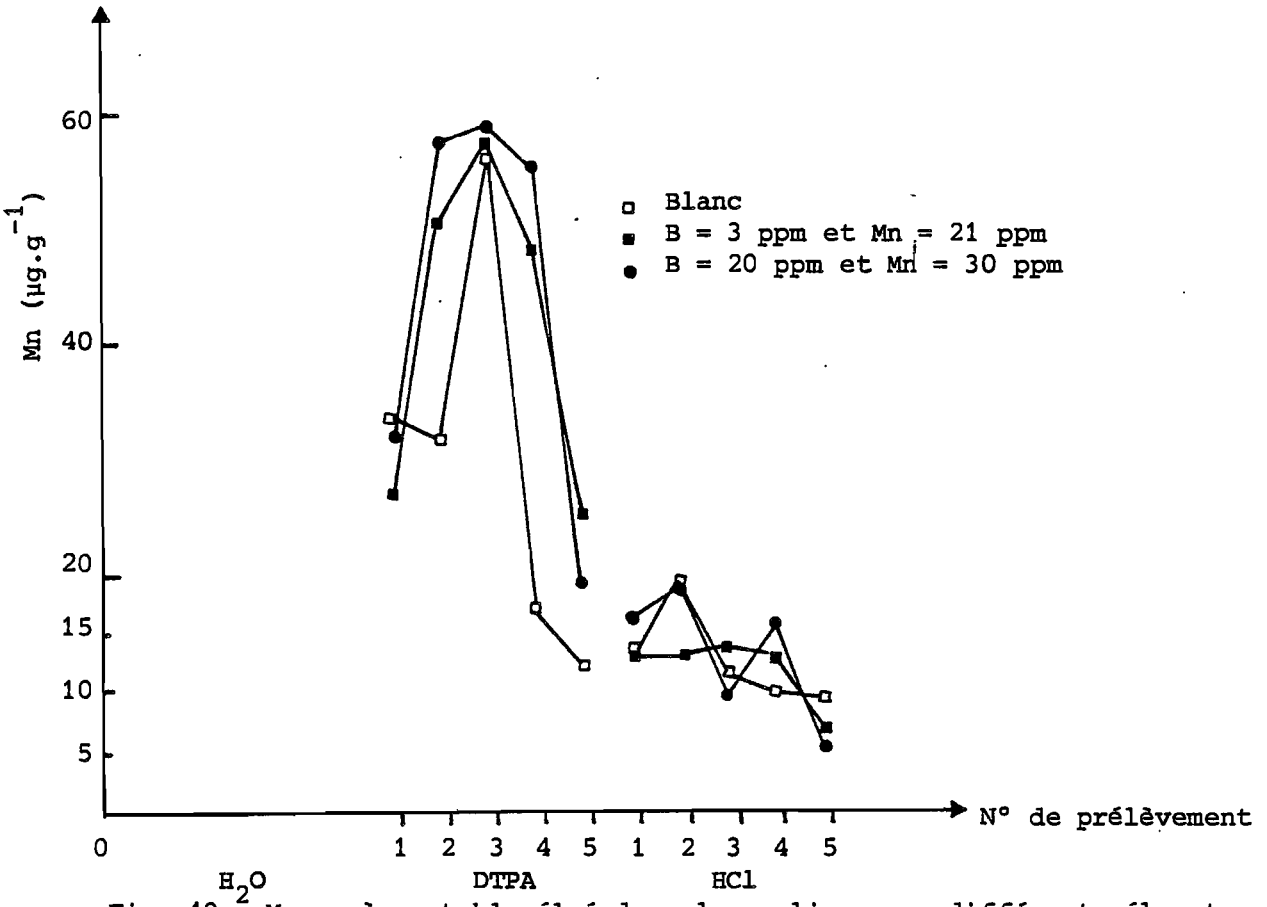


Fig. 40 - Manganèse stable élué du sol sur limon par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

Ceci montre le prudence avec laquelle il faut fertiliser en bore surtout lorsque celui-ci est sous forme d'acide borique facile à lessiver, accroissant de ce fait le risque d'augmentation de la concentration du bore dans les eaux souterraines , surtout dans le cas du sol sur alluvion.

4.5. Elution du manganèse stable.

4.5.1. Elution du manganèse stable de sol sur limon.

La figure 40 montre l'évolution de l'élution du manganèse: il est clair que le manganèse, comme nous l'avons montré dans la précédente expérience, est dans tous les cas très peu élué à l'eau. Dans le meilleur des cas (ajout de 21ppm de Mn et de B) son élution totale de 2,50 µg/g, tandis que en cas du blanc elle est de 1,39 µg/g.

L'élution au DTPA 0,005 M se montre la plus efficace, elle extrait une quantité du manganèse supérieure à celle ajoutée. Nous essayerons avec l'extraction du manganèse radioactif de décomposer ces deux parties de manganèse extrait. L'élution au DTPA passe dans les trois traitements par un maximum au troisième prélèvement pour décroître ensuite (fig. 40), ce qui va dans le même sens que l'expérience précédente. Le DTPA extrait au total les pourcentages donnés dans le tableau 32. Nous pouvons conclure que malgré l'ajout plus important de manganèse, son extraction n'augmente pas en présence d'un ajout important de bore. Ce qui signifie que le bore a une action négative sur l'extraction de manganèse. L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N bien qu'elle baisse le pH des éluats jusqu'à 2,8 (dernière fraction) elle reste beaucoup moins importante par rapport à celle au DTPA (voir tableau 32). Ceci laisse supposer que le manganèse extractible à Hcl devient trop faible; elle reste tout de même plus importante que pour les deux autres sols (voir tableau 32). L'extraction à l'acide chlorhydrique 0,1 N confirme que l'apport important de bore joue une action négative sur l'extraction du manganèse (voir fig. 40 et tableau 32) : des quantités sensiblement proches de manganèse sont extrait dans le cas d'apport de 20ppm de bore et 30ppm du manganèse et dans le cas d'apport de 3ppm de bore et de 21ppm de manganèse.

Tableau 32 - Elution du manganèse (en % de Mn total) des sols étudiés aux différents réactifs.

Eléments ajouté (ppm)	Mn/H20			Mn/DTPA			Mn/Hcl.		
	S.L	S.R	S.A	S.L	S.R	S.A	S.L	S.A	S.A
Blanc	0,34	0,17	0,01	28.2	40,0	18.4	11,3	5,8	6,7
B=3et Mn=21	0,46	0,19	0,01	37,3	43,5	20,0	12,8	8,1	6,8
B=20 et Mn=30	0,29	0,19	0,01	39,4	41,1	19,2	11,6	7,9	6,6

Pour la légende se repporter au Tableau 37.

4.5.2. Elution du manganèse stable du sol de rendzine.

L'élution du manganèse est illustrée par la figure 41, elle ressemble pour les traitements communs à celle de l'expérience précédente. Cette élution comme pour les autres sols est négligeable (voir tableau 32), le manganèse ajouté n'est pas solubilisé à l'eau puisque la différence avec le blanc est pratiquement nulle. L'élution au DTPA est la plus importante (fig.41), Ce réactif chelatant extrait plus du manganèse de ce sol que de sol sur limon et même du sol sur alluvion tout deux plus riches en manganèse total.

La quantité totale du manganèse élué est supérieure à celle ajoutée mais cela ne veut pas dire pour autant que tout le manganèse ajouté est extrait, ce problème est repris avec le ^{54}Mn. Le tableau 32 nous montre les pourcentages de manganèse extrait par rapport au manganèse total des sols. Les résultats montrent l'effet négatif du bore sur l'extraction du manganèse. Cette extraction est élevée à la première fraction, elle augmente encore à la deuxième ou la troisième (cas de blanc) pour décroître sensiblement ensuite (fig. 41). L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N est sensiblement moins importante; elle varie en fonction d'apport.

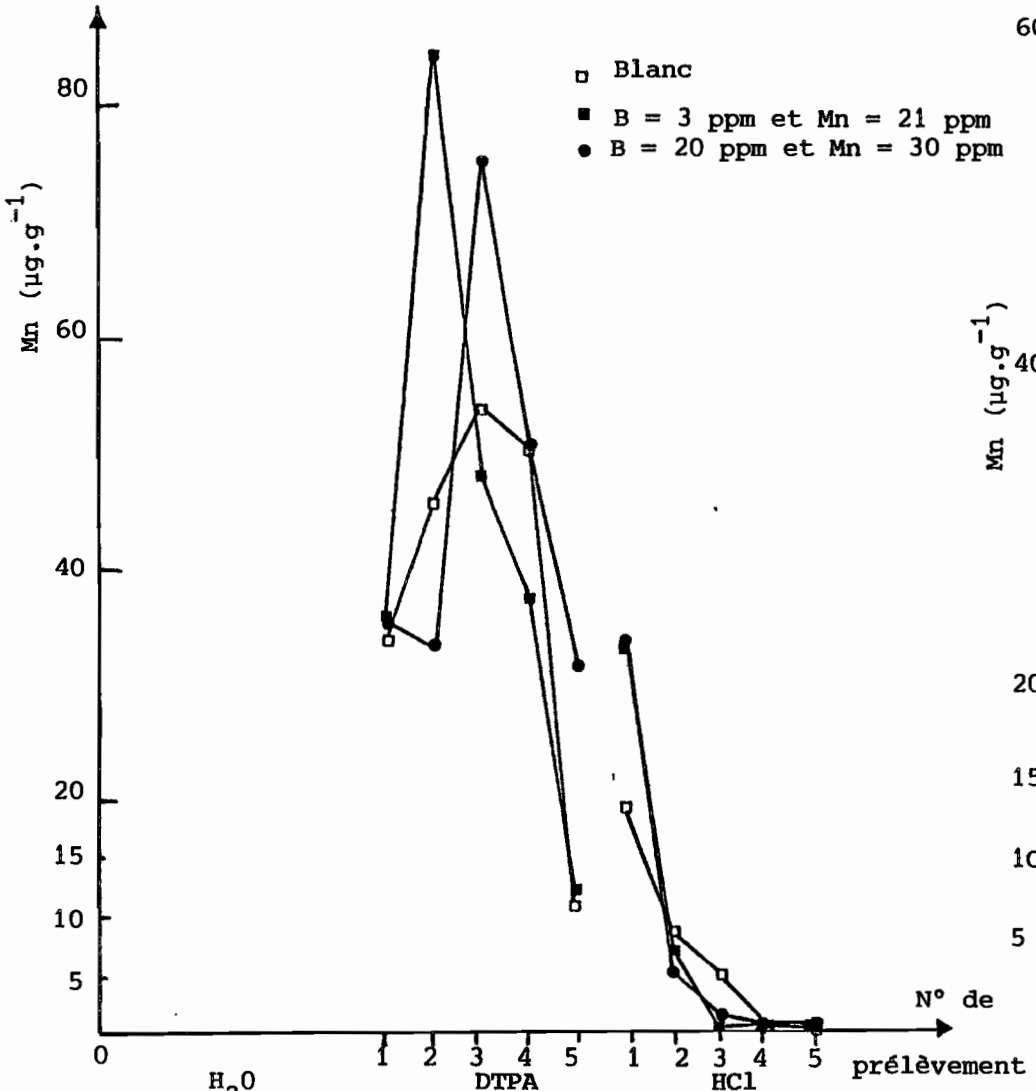


Fig. 41 - Manganèse élué du sol de rendzine par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

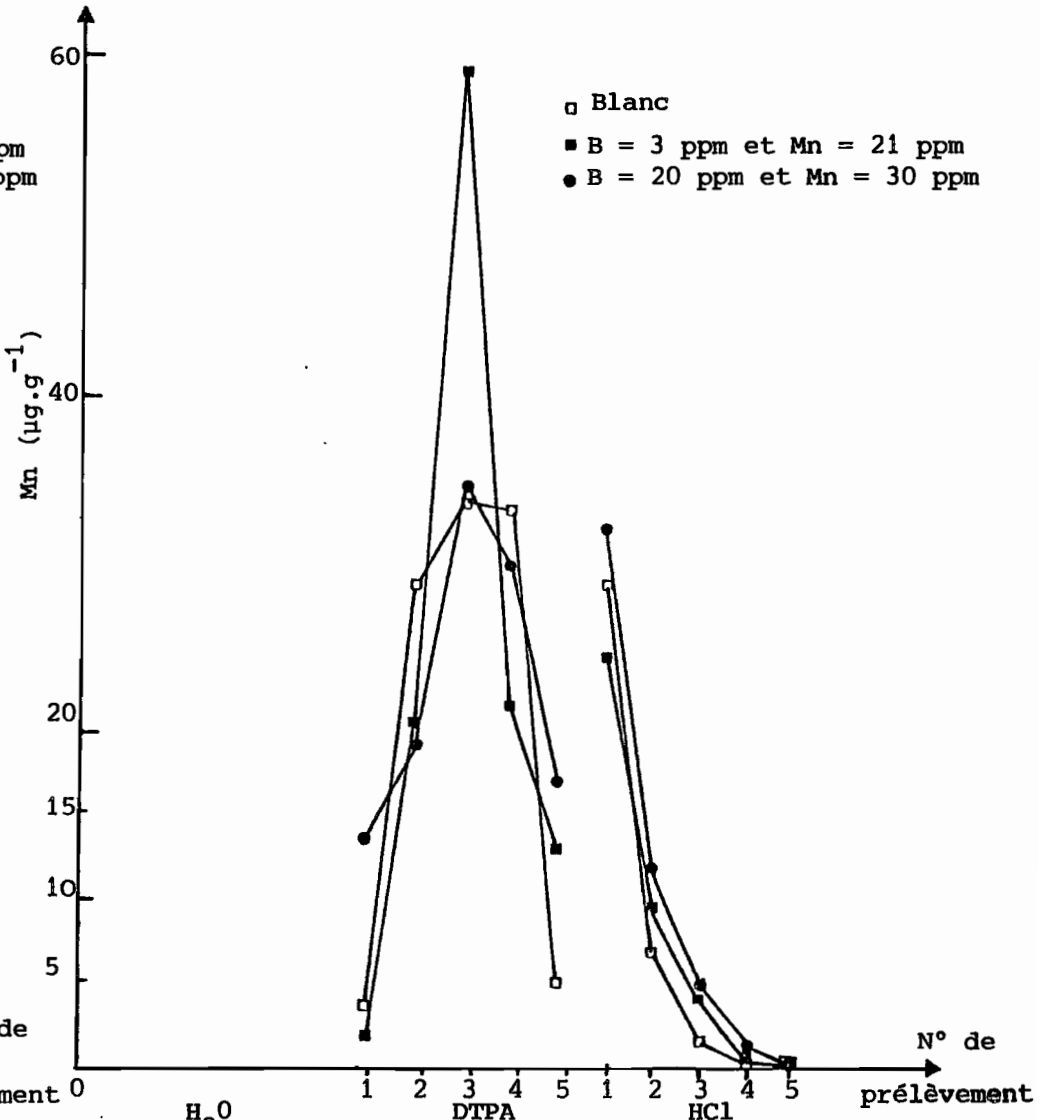


Fig. 42 - Manganèse élué du sol sur alluvion par différents éluants en relation avec l'apport de bore et de manganèse.

L'acide chlorhydrique 0,1N ne modifie pratiquement pas le pH des éluats, il est neutralisé du fait de la teneur élevée de ce sol en calcaire. Pour tous les traitements l'acide chlorhydrique élué solubilise plus de manganèse au premier prélèvement (18,88 µg/g sur un total de 27,94 µg/g de manganèse extrait dans le cas du blanc), pour décroître fortement au deuxième prélèvement et devenir négligeable ensuite. Le bore persiste dans son action négative sur l'extraction du manganèse (voir tableau 32).

4.5.3. Elution du manganèse stable du sol peu évolué sur alluvion.

La figure 42 trace l'évolution de l'élution du manganèse en fonction de traitements et d'éluants. L'élution du manganèse à l'eau est encore plus négligeable que dans les autres sols. L'élution au DTPA 0,005M est la plus efficace, le manganèse élué dépasse la totalité de celui ajouté. Le manganèse élué est faible pour le premier prélèvement il devient important pendant le deuxième et le troisième prélèvement. pour décroître de nouveau ensuite (fig.42). Dans les différents traitements le manganèse extrait au DTPA représente les pourcentages donnés dans le tableau 32. Ces résultats permettent de dégager deux remarques importantes : la première concerne la faible extraction du manganèse par rapport aux deux autres sols et la deuxième montre que le bore joue un rôle négatif sur l'extraction du manganèse. L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1N est dans ce cas aussi moins importante, le manganèse extrait est maximal pour tous les traitements pendant le premier prélèvement (37 µg/g pour un total de 48,7 µg/g en cas du blanc par exemple), il décroît fortement au deuxième prélèvement et surtout au quatrième et au cinquième prélèvement (voir fig.42). Le pH des éluats n'est pratiquement pas modifié par l'acide chlorhydrique (7,4 à 7,1), c'est le calcaire élevé de ce sol qui neutralise l'effet de l'acide chlorhydrique.
Le manganèse extrait par l'élution à l'acide chlorhydrique ne varie pratiquement pas sous l'effet d'ajout du bore et du manganèse (tableau 32).

4.6. Mesures de la radioactivité.

La mesure de la radioactivité dans les colonnes par le détecteur de contrôle (Babyline) a permis de dégager les informations intéressantes suivantes : le manganèse ajouté est fixé en grande partie dans les premiers 10 cm de la terre des colonnes, l'eau extrait le manganèse de la

partie inférieure des sols des colonnes, aucune radioactivité n'étant présente dans les éluats à l'eau.

Huit jours après l'ajout de ^{54}Mn, nous avons détecté le maximum de radioactivité à la surface des colonnes. A 5 cm plus bas la radioactivité baisse de 21 %, à 10 cm de profondeur elle décroît de 80% et au fond des colonnes elle décroît. A la fin de l'élution au DTPA nous avons mesuré une faible radioactivité à la surface des colonnes, elle est néanmoins plus importante pour le sol sur alluvion, et pratiquement nulle au fond des colonnes.

A la fin de l'expérience nous avons contrôlé la radioactivité dans les colonnes et nous avons observé que la radioactivité résiduelle est faible par rapport à celle inoculée, la majeur partie de la radioactivité résiduelle réside dans les premiers cinq centimètres elle décroît ensuite graduellement (dans le même ordre cité ci-dessus); parmi les colonnes des trois sols ce sont celles du sol sur alluvion qui retiennent le plus du manganèse radioactif.

Nous avons mesuré aussi :

4.6.1. - Coefficient d'élution de la radioactivité :

Nous avons calculé; à partir des comptages de la radioactivité, ce que l'on peut appeler "coefficient d'élution" de la radioactivité ou de ^{54}Mn. Si on a R_s exprimant la radioactivité comptée dans les éluats, R_I exprimant la radioactivité introduite au sol des colonnes et BF exprimant le bruit de fond de détecteur ce coéfficient d'élution ou C.E. est donné par la relation :

$$C.E. = \frac{R_s - BF}{R_I - BF} \times 100.$$

Nous nous efforçons de trouver une relation entre le C.E. de ^{54}Mn et le manganèse stable élué, ce qui nous autoriserait d'éclairer la possibilité, grâce à ^{54}Mn, de cerner la nature du manganèse élué dans ce système hétérogène.

4.6.2. - Radioactivité spécifique (R.A.S).

Définition.

FARDEAU (1981) définit la R.A.S. par la relation :

$$S = \frac{R_o}{M_r + M_e}$$

soit R_o une quantité de radioactivité pour un élément X, M_r sa masse et M_e la masse de l'élément stable qui lui est parfois associé.

Si le mélange est homogène, la grandeur (S) définit la radioactivité spécifique de l'élément (X) et (M_e) est l'entraîneur de (R_o). Dans le cas des isotopes à période limitée (T<1 an), c'est le cas de ^{54}Mn (284 jour), M_r est généralement négligeable devant (M_e).

Mesure d'une R.A.S. - Caractéristique particulière.

Selon FARDEAU (1981) la détermination d'une R.A.S. ne requiert pas la connaissance des quantités totales de R_o et de M_e.
Il s'agit d'un rapport dont la valeur peut être obtenue à partir des mesures de radioactivité et de masse sur une fraction limitée du mélange isotopique, si les isotopes sont correctement mélangés.

C'est cette propriété qui confère à la technique isotopique tout son intérêt et toute sa fécondité puisqu'elle permet l'analyse des systèmes complexes sans que ceux-ci soient perturbés par des ajouts ou des prélèvements trop importants.

L'objectif est de calculer une R.A.S. inconnue de manganèse élué lorsque celui-ci est présent dans l'éluat, ce calcul est réalisé par la relation $R.A.S. = \frac{R_s}{Q}$ R_s étant la radioactivité éluée (ipm) et Q étant la quantité de manganèse stable élué ($\mu g.\ ml^{-1}$). Ce calcul repose donc sur deux mesures qui concernent l'une l'élément radioactif et l'autre l'élément stable.

Cette R.A.S. est comparée avec la radioactivité spécifique introduite ou $R.A.S_o$. qui est donnée par la relation :

$$R.A.S_o = \frac{R_o}{Q_o}$$ R_o étant la radioactivité (ipm) introduite au départ dans les colonnes et Q_o étant la quantité de manganèse ($\mu g.\ ml^{-1}$) introduite au départ également dans les colonnes.

4.7. Coefficient d'élution de la radioactivité (^{54}Mn).

Les coefficients d'élution totale au DTPA et à l'acide chlorhydrique (l'eau n'ayant pas élué de radioactivité) pour les trois sols en cas d'ajout de ^{54}Mn (le blanc n'ayant pas eu de radioactivité) sont récapitulés dans le tableau 33.

Tableau 33 - Tableau synoptique des coéfficients d'élution (C.E.%) de radioactivité (^{54}Mn) et de Mn stable.

Sol	Traitement	C.E. % (^{54}Mn)		% Mn stable élué	
		DTPA	Hcl	DTPA	Hcl
Sol sur limon	1	84,1	1,2	70,7	26,8
	2	89,7	4,5	88,4	13,8
Sol de rendzine	1	75,6	9,8	68,8	30,1
	2	73,8	0,9	78,1	29,0
Sol sur alluvion	1	60,0	12,6	55,2	14,3
	3	52,7	11,7	48,5	5,8

1 - Ajout de 21ppm de Mn et 3ppm de B.

2 - Ajout de 30ppm de Mn et 20ppm de B.

Nous pouvons faire les commentaires suivants :

- L'élution au DTPA est indiscutablement la plus importante pour le manganèse stable ou radioactif.
- L'élution au DTPA montre que dans tous les cas il y a une relation entre la radioactivité éluée et le manganèse stable élué, cette relation est très étroite en cas du sol sur alluvion (voir tableau 33).

Les fractions extraites de traceur (^{54}Mn) et celles du manganèse stable sont plus proches en cas d'ajout de 30ppm du manganèse et de 20ppm du bore, cela permet d'avoir une idée assez précise sur la nature du manganèse extrait. Il est clair que c'est le sol sur alluvion qui fixe le plus de manganèse stable et radioactif, les deux autres sols perdent la totalité du manganèse ajouté.

La cinétique de l'élution de ^{54}Mn et de Mn satble et différente surtout en cas d'élution à l'acide chlorhydrique 0,1 N qui extrait en général plus du manganèse stable que de ^{54}Mn, on pourrait penser que le comportement de ^{54}Mn serait différent de celui du manganèse stable et à cet égard le cinétique de dilution isotopique aurait pu donner plus de précision. Dans cette expérience les conditions d'extraction (vitesse, durée) peuvent être accusées de jouer un rôle quoi que secondaire dans la différence trouvée, cela n'explique tout de même pas la différence trouvée dans le même éluat entre manganèse radioactif et stable, il est donc fort probable que la cinétique de fixation des deux manganèses est à l'origine en grande partie de cette différence.

Le chevauchement constaté entre le manganèse élué du blanc et des traitements avec ajout permet de conclure aisément que le manganèse ajouté ne se mélange pas d'une manière homogène avec le manganèse préexistant du sol. Toutefois il n'est pas certain qu'une alternance humectation - dessication à laquelle presque tous les sols sont soumis conduirait à la même conclusion.

Les coeficients d'élution montrent aussi que dans le cas de deuxième traitement (ajout du manganèse plus important) la radioactivité éluée, comme d'ailleurs le manganèse stable élué, n'est pas plus importante.

4.8. Mesure de radioactivité spécifique (RAS).

Nous avons calculé la RAS et nous avons alors tracé les graphiques 43 et 44. La RAS rend compte à la fois de la radioactivité (donc de ^{54}Mn) et du manganèse stable : plus la radioactivité croît plus la RAS croît (la radioactivité étant le nominateur de cette relation), par contre plus le manganèse stable croît plus la RAS décroît (Q étant le dénominateur de cette relation). La RAS illustrée sur les graphiques 43 et 44 montrent que dans les éluats plus la RAS est importante moins le manganèse stable élué est important; à titre d'exemple si on regarde le graphique 44 de l'élution au DTPA dans le cas d'ajout de 3ppm de bore et de 21ppm de manganèse, on constate une décroissance très importante de la RAS pour le troisième prélèvement ce qui coïncide avec une élution importante du manganèse stable entraînant cette décroissance malgré une élution de la radioactivité la plus importante parmi les cinq éluats (RAS = $7,46.10^4$ipm/ml d'éluat), c'est-à-dire que le rapport RAS diminue en fonction du prélèvement et du temps d'une façon générale (voir fig. 43 et 44). Ceci prouve qu'il y a plus de manganèse qui passe de la terre à l'éluat. Il en va de même dans les autres graphiques, on note aussi l'importance disproportionnelle entre la RAS dans le cas d'élution au DTPA et dans le cas de l'élution à l'acide chlorhydrique (fig. 43 et 44). L'allure de ces graphiques permet de confirmer aisément que bien qu'il y ait correspondance entre comportement de la radioactivité et le manganèse stable du sol, ces comportements ne sont pas identiques, cela peut dire aussi que le mélange entre manganèse radioactif et manganèse du sol d'une part et manganèse stable et manganèse du sol ne se fait pas de part et d'autre de façon homogène; on ne peut donc pas parler de pool homogène du manganèse injecté au sol et du manganèse préexistant au sol. Il est important de noter que cela ayant lieu in vitro n'est forcément applicable (sans test préalable) aux sols agricoles.

Nous avons jugé utile d'étudier la relation entre la RAS et la RAS_o qui est une indication supplémentaire sur le manganèse introduit et le manganèse élué, les résultats sont donnés dans le tableau 34. La RAS en cas d'élution à Hcl étant négligeable, nous avons donné la RAS pour les deux éluants (DTPA et Hcl) ensemble. Il est fort important de constater un rapport presque identique de RAS/RAS_o pour le même sol en dépit de la différence entre les quantités ajoutées du bore et du manganèse.

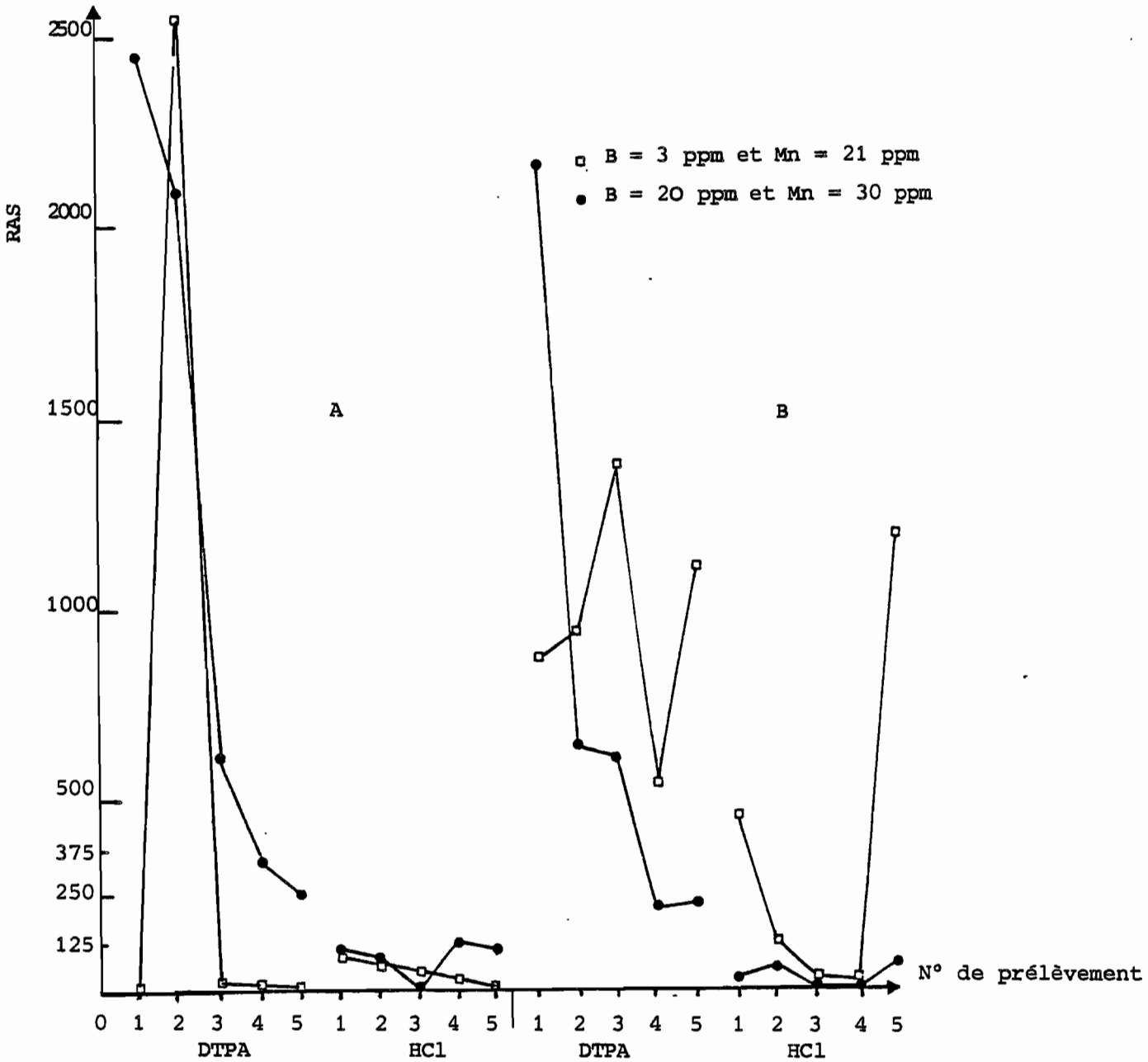


Fig. 43 - Radioactivité spécifique (RAS) pour le sol sur limon (A) et le sol de rendzine (B).

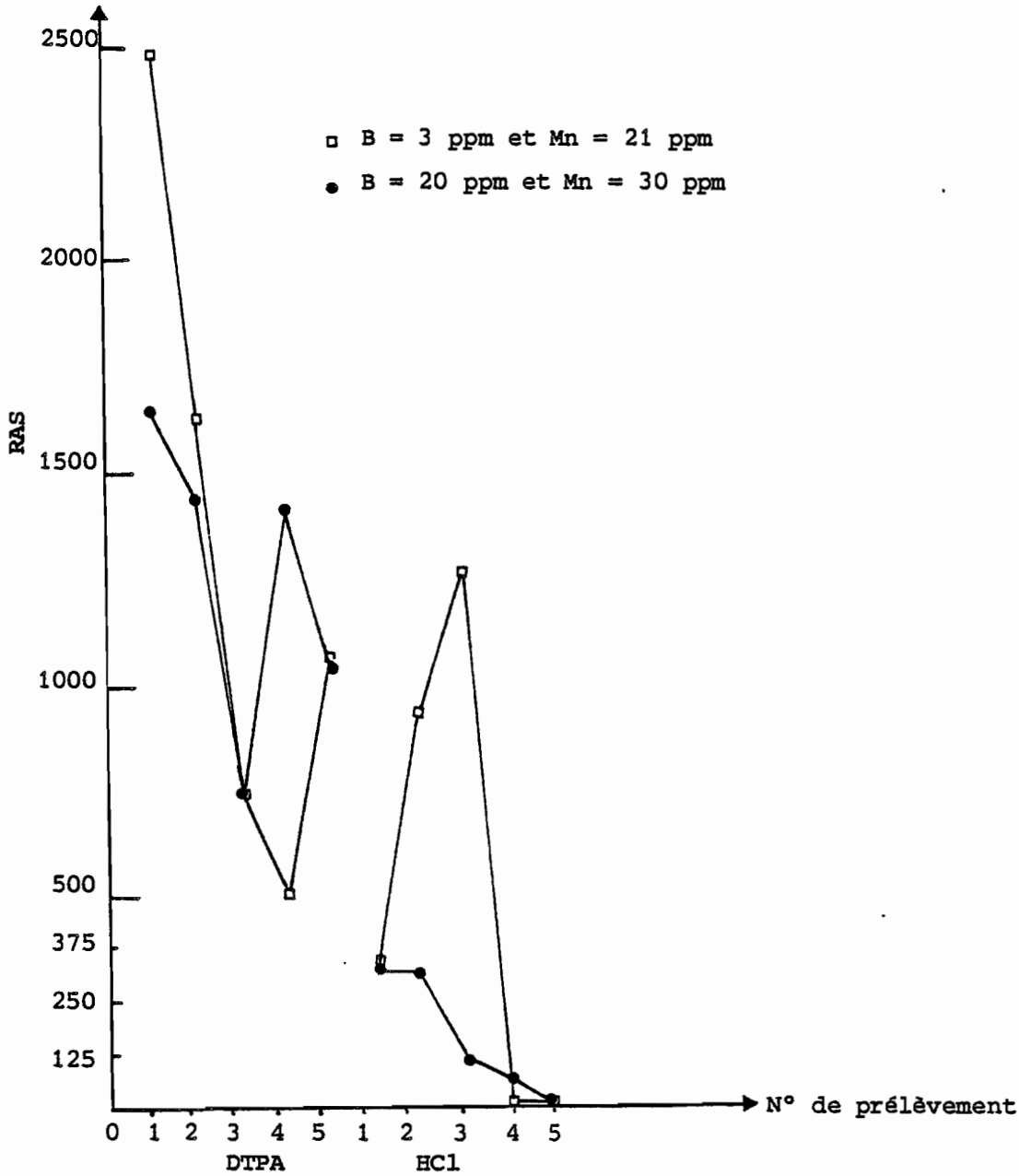


Fig. 44 - Radioactivité spécifique (RAS) du sol sur alluvion.

TABLEAU 34 - Relation (%) entre RAS et RAS_0.

Sol	Traitement	% $RAS/_{RASo}$
S.L.	1	71
	2	71
S.R.	1	47
	2	50
S.A.	1	80
	2	84

Légende

S.L : sol sur limon
S.R. : sol de rendzine
S.A. : sol sur alluvion

1 - Ajout de 3ppm de bore et de 21 ppm de manganèse
2 - Ajout de 20ppm de B et de 30ppm de Mn.

Nous soulignons que le rapport élevé de RAS/RAS_o en cas du sol sur alluvion, vient de la RAS_o moins importante pour ce sol à cause de la quantité totale ajoutée de manganèse calculé par rapport au poids total du sol dans la colonne qui y est plus élevée (poids de la terre 270g/colonne contre 250 g/colonne pour les deux autres sols). Ce rapport diminue en fonction de l'éluat; il est plus important en général dans le premier éluat que dans le cinquième ce qui prouve qu'il y a plus de manganèse qui passe de la terre à l'éluat.

V - 5 - *INTERPRETATION*

Le milieu d'élution dans lequel les résultats obtenus vont être interprétés ci-dessous, est considéré comme un milieu poreux saturé.

5.1. Le cuivre.

L'élution à l'eau du cuivre nous permet d'énoncer que le pool des ions extractibles à l'eau est très faible pour les trois sols étudiés par rapport aux ions extractibles au DTPA, cela peut être interprété par l'hypothèse d'une rétention du cuivre aux particules, à l'intérieur ou à la surface, du sol plus forte que son extraction et sa dilution à l'eau. Nous nous efforcerons de voir si en fonction de ce que les plantes absorbent de cet élément, cette élution a une signification en rapport avec le cuivre susceptible d'être absorbé par les plantes. Les résultats de l'élution à l'eau pour les trois sols tendent à favoriser un rôle du pH puisque c'est du sol sur limon avec son pH le plus faible que l'eau extrait le plus de cuivre. Ce résultat est appuyé par ceux de l'élution au DTPA et à l'acide chlorhydrique. Tout de même ce rôle n'est pas aussi important que ce que LINDSAY (1972) a indiqué. FOLLETT et al., (1981) ont signalé que plus le pH croit plus le cuivre se complexe avec les anions hydroxyles formés à pH élevé. Il serait tout de même imprudent de négliger le rôle de la matière organique surtout dans le cas du sol de rendzine dont la teneur en matière organique est élevée (10,2%) et pour lequel l'extraction du cuivre est faible. En réalité la réaction du cuivre avec cette matière organique forme des complexes très stables (FOLLETT et al.1981). Ces chercheurs ont souligné que des recherches ont montré que les groupes carboxyles et phénoliques attachés aux composés hétérocyliques de la matière organique du sol jouent un rôle important dans cette rétention forte du cuivre par effet de la matière organique. NORVELL (1972) a signalé de son côté que les chélates naturels présents dans la matière organique sont très stables et que le rapport du cuivre des chélates aux ions cupriques dans la solution du sol pourrait atteindre 10 : 1 et peut être même 1000 : 1 dans les sols alcalies, ce qui pourrait aider à comprendre la faible extraction du cuivre de sol de rendzine même par l'acide chlorhydrique qui est encore plus faible que dans les deux autres sols. Il est nécessaire de prêter attention à l'effet antagoniste du manganèse ajouté sur le cuivre extrait et à l'effet modérément synergique du bore ajouté surtout en cas de sol sur alluvion

où le bore ajouté peut atténuer l'effet antagoniste du manganèse qui complexerait le cuivre en le rendant moins soluble (PADMANABHAM,1983).

5.2. Le fer.

Notre expérience d'élution à l'eau a montré sans équivoque la faible solubilité du fer à l'eau, elle est d'autant en plus faible lorsque le pH est plus élevé, cette solubilité décroît dans l'ordre suivant : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion tandis que le pH augmente dans l'ordre inverse sol sur limon (6,3) < sol de rendzine (7,9) < sol sur alluvion (8,5) et que leurs teneurs totales croisent dans le même sens que le pH. Ce résultat est confirmé par l'élution à l'acide chlorhydrique qui extrait le plus du fer du sol sur limon en abaissant encore plus le pH de ses éluats.
Le pH semble donc jouer un rôle plus important dans l'extraction du fer et sa cinétique que dans celle du cuivre. Il est de grand intérêt de signaler que les conditions du milieu poreux saturé créent les conditions de la réduction du fer favorisant la formation de fer ferreux surtout dans les pH faibles ce qui est le cas du sol sur limon; en plus la faible teneur de ce sol en matière organique qui est susceptible de complexer le fer sous forme des chelates stables (KNEZEK & ELLIS,1980), est un facteur supplémentaire qui facilite la solubilisation du fer du sol sur limon. En fait KNEZEK & ELLIS, (1980) ont signalé trois processus chimiques de sol qui sont d'une extrême importance dans la chimie du fer dans les sols : le pH, l'état de réduction et la chélation par la matière organique.

Le milieu poreux saturé, donc soumis à une humectation continue, serait d'avantage favorable à l'extraction du fer que des conditions du milieu naturel soumis à une alternance d'humectation - dessication dans lequel l'oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) est relativement plus rapide, d'où moins de fer soluble.

ADAM et ANDERSON (1983) ont montré que le DTPA extrait plus du fer des échantillons maintenus continuellement humides par rapport à ceux soumis à des cycles d'humectation - dessication.

Le fer comme les autres métaux de transition forme des nombreux complexes stables ce qui permet un possible mécanisme pour décroître sa solubilité comme on l'a constaté dans nos sols.

Nos résultats d'élution séquentielle à l'acide chlorhydrique montrent une décroîssance systématique (dans les trois sols) du taux d'extraction du fer dans les derniers prélèvements au détriment de la décroîssance du pH de ces mêmes prélèvements; une explication parait plausible : la présence d'un seuil critique de l'influence du pH sur la mobilité du fer concordant avec un seuil critique du fer mobile dans le sol au-delà duquel l'influence du pH est à revoir. Nous avons remarqué que le cinquième éluat est à la fois le plus pauvre en fer et a le plus faible pH.

Nous avons constaté une décroissance du fer mobilisé par le DTPA ou l'acide chlorhydrique lorsque les sols sont enrichis avec 30ppm de manganèse, ce phénomène a eu lieu, bien que à un degré moindre, lorsque les sols sont enrichis avec 20 ppm de bore ; cet effet moindre se répercute sur l'effet du manganèse pour le modérer en présence de la combinaison de ces deux éléments. Le manganèse pourrait selon toute vraisemblance, s'échanger avec le fer de phase soluble ou de pool des ions extractibles en le remplaçant donc sous cette forme soluble par des éluants (la totalité du manganèse ajouté étant éluée) et en rendant le fer sous forme complexée difficilement soluble .

5.3. Les éléments majeurs élués (Ca, K, Mg).

Nous avons montré un net effet du pH sur le calcium élué à l'eau, cet effet est indépendant du calcium total du sol. Cette fraction appelée pool des ions extractibles à l'eau,est la plus forte en cas du sol sur limon dont le pH et la teneur en calcium total sont les plus faibles parmi les trois sols. Le calcium soluble à l'eau est très faible, il est retenu fortement à la surface des particules colloïdales des sols (FOLLETT at al. 1981). L' acide chlorydrique 0,1 N mobilise plus de calcium que le DTPA et l'eau. La mesure des pH des éluats a montré qu'il y a une relation entre le pH des éluats et le calcium élué dans ces éluats ce qui confirme le rôle de pH dans la sorption de calcium. D'après cette étude l'effet du pH n'est pas indéfini, mais il est en relation avec le calcium susceptible de passer de la phase solide à la phase solution dans les limites de la durée de cette expérience. MURALI et AYLMORE (1983) ont indiqué que le pH est un facteur important influençant l'adsorption et la sorption dans des multiples systèmes des sols sans préciser les limites de cette influence.

La désorption du calcium comme celle du potassium et du magnésium commence faible pour atteindre un maximum souvent au deuxième prélèvement ensuite elle décroît jusqu'à la fin de l'élution. L'ajout du bore et du manganèse n'influence pas la mobilité du calcium, toutefois un effet positif a pu être décelé en cas d'élution à l'acide chlorydrique sur les colonnes ayant reçu 20ppm de bore et 30ppm de manganèse.

La rétention du potassium dans nos trois sols n'est pas en relation avec le pH de ces sols; en effet nous avons montré que les trois éluants solubilisent plus de potassium du sol sur alluvion et du sol de rendzine que du sol limon malgré que le dernier sol ait le pH le plus faible. Ce résultat est en accord avec le rapport entre cations totaux et cations échangeables que nous avons trouvé précédemment (tableau 9 chapitre II). Il serait difficile de dire que le potassium solubilisé est en relation avec la matière organique car le sol sur limon, bien qu'il en soit moins riche que le sol de rendzine, mais il est plus riche que le sol sur alluvion. La seule caractéristique qui va dans le sens de la différence de solubilisation est la quantité d'argile (<2µm) (voir tableau 4, chapitre II). STARK et ZUURING (1981) ont montré qu'il est difficile de prédire le potassium échangeable car il est en relation avec de nombreuses variables (3 à 9).

Le potassium bien qu'il soit moins extrait par l'eau que par le DTPA ou le HCl est plus extrait par l'eau que le calcium et le magnésium, il parait donc de ce point de vue, moins retenu par le sol que ces deux autres cations. STARK et ZUURING (1981) ont indiqué que la solubilité du potassium varie beaucoup entre les sols et que dans certains sols il est difficilement soluble à l'eau et même aux acides. Nous avons trouvé que le potasium extrait par le DTPA et l'acide chlorhydrique est beaucoup moins important que le calcium et le mangnésium. FOLLETT et al., (1981) ont rapporté que même si les sols ont comparativement beaucoup de potassium total, le potassium retenu sous forme facilement échangeable peut être faible; ils ont rapporté aussi que les sols calcaires sont riches en potassium échangeable. L'ajout du bore et du manganèse ne semble avoir un effet sur le potassium extrait qu'en cas d'ajout de 20ppm de bore et de 30ppm de manganèse pour le sol sur limon; dans ce cas cet ajout a curieusement un effet positif sur l'extraction du potassium pour le DTPA et l'acide chlorhydrique.

Notre étude a montré que le DTPA solubilise le plus du magnésium, elle a prouvé aussi que l'extraction de cet élément est en relation avec le pH des sols; en réalité, bien que le sol sur limon soit disproportionnellement moins riche en magnésium total que les deux autres sols (voir 4.3 - Elution de magnésium), l'extraction du magnésium ne suit pas la même relation : le magnésium élué du sol sur limon rapporté au magnésium total est 7,4 fois plus important qu'en cas du sol sur alluvion et 3,4 fois plus important qu'en cas du sol de rendzine. Ceci montre, en outre, que le magnésium total n'est pas en relation étroite avec le magnésium extractible par ces éluants. FOLLETT et al., (1981) ont rapporté que si le magnésium total n'est pas en relation étroite avec la croissance des plantes et le magnésium extractible cela serait à cause de relative insolubilité du magnésium présent dans les minéraux primaires et secondaires qui renferment une quantité importante de cet élément. STARK et ZUURING (1981) ont montré qu'il est difficile de prédire la solubilité et le stockage du magnésium dans les sols à partir de leurs textures ; la relation, entre ces divers éléments est très variable.

La dynamique de l'élution du magnésium varie selon cette étude d'un sol à l'autre et d'un éluant à l'autre· cette dynamique serait en relation à la fois avec le magnésium extractible dans le sol et la capacité d'extraction de l'éluant. Nous avons noté que l'extraction du potassium est l'inverse de l'extraction du magnésium, par exemple dans le sol sur limon ou l'extraction de potassium est le plus faible parmi les trois sols, l'extraction du magnésium est la plus importante, FOLLET et al., (1981) ont rapporté un effet antagoniste entre le potassium et le magnésium.

5.4. Le bore.

Nous avons constaté que parmi les trois sols l'eau extrait moins de bore du sol de rendzine tandis qu'elle extrait une quantité presque égale du sol sur limon et du sol sur alluvion, ce qui est en accord avec le bore extrait à l'eau bouillante (voir tableau 26 chapitre IV) cela serait en partie en relation avec le bore total, qui est le plus élevé dans ces deux sols que le sol de rendzine .rl est probable aussi que la teneur élevée en matière organique de ce dernier sol ait un rôle dans l'adsorption forte du bore sur les molécules de la matière organique à laquelle la majeure partie du bore"assimilable" est associée (BERGER, 1949),

surtout au pH > 7,5 (FOLLETT et al., 1981) (pH de sol de rendzine = 7,9). D'autre part REISENAUER et al., (1973) ont rapporté que la sorption du bore par les sols augmente avec la teneur en matière organique.

Cette fraction soluble à l'eau, servant pour certains auteurs (FLEMING, 1980), de guide pour estimer la capacité nutritionnelle en bore d'un sol, classe le sol sur limon et le sol sur alluvion, selon les critères établis par plusieurs auteurs (REISENAUER al., 1973 ; FLEMING, 1980; EVANS et SPARKS, 1983 ...) à la limite des sols approvisionnant les plantes par une quantité suffisante du bore tandis que le sol de rendzine est parmi les sols sur lesquels les plantes peuvent souffrir d'une carence en bore. Le bore soluble à l'eau dans nos sols n'est pas en relation systématique avec le PH il dépendrait de plusieurs paramètres à la fois selon cette étude. ELRASHIDI et O' CONNOR (1982) ont trouvé une faible corrélation entre le pH et la désorption du bore.
La cinétique de l'élution du bore aux trois éluants en cas du blanc est évolutive, c'est-à-dire qu'elle augmente en fonction du temps dans les trois sols étudiés, toutefois elle est pratiquement stationnaire en cas d'élution à l'eau et à HCl sur le sol sur alluvion. En cas d'ajout du manganèse (30ppm) cette élution est pratiquement stationnaire, sauf en cas d'élution au DTPA du sol sur limon ou elle l'est pendant le deuxième et le troisième prélèvements puis elle décroît pour le quatrième et le cinquième prélèvements. En cas d'ajout à la fois du bore et du manganèse ou uniquement du bore, cette cinétique prend une autre forme: elle commence élevée pour continuer à croître jusqu'au deuxième, (sol sur limon), troisième (sol de rendzine) et au quatrième (sol sur alluvion) prélèvement puis elle décroît substantiellement jusqu'à la fin.
Toutefois en cas d'élution au DTPA et à Hcl sur sol de rendzine, l'élution commence importante pour décroître dès le deuxième prélèvement puis elle est relativement constante.

Il nous semble que cette cinétique, peu étudiée (EVANS et SPARKS, 1983), est en relation avec le déplacement indéfini des particules solides à la solution libre et vice-versa des molécules du bore qui varient éventuellement d'un sol à l'autre selon leurs caractéristiques. ELRASHIDI et O'CONNOR (1982) ont rapporté la complexité des réactions de la désorption du bore et les résultats conflictuels obtenus par les auteurs à cet égard. A notre avis la différence entre ces résultats viendrait d'une part de la différence entre les sols et d'autre

part et des conditions expérimentales adoptant souvent l'agitation de mélange sol-liquide qui est loin de ce qui passe dans la nature; à cet égard l'élution sur colonne s'approche plus que l'agitation des conditions au champ.

Notre étude a montré une élution du bore beaucoup plus forte à l'eau par rapport à l'élution au DTPA et encore plus forte par rapport à son élution à Hcl même si le Hcl en cas du sol sur limon rend le pH des éluats plus faible (2,4 pour le cinquième prélèvement du sol sur limon). Il nous semble que si le Hcl ne déplace pas beaucoup de bore après l'élution à l'eau malgré l'acidité du milieu c'est-à-dire l'abondance relative des ions H^+ dans le milieu, il est plausible de dire que l'échange toujours indifini des molécules de bore de la phase solide à la phase solution et vice-versa soit ralentie surtout dans le sens phase solide → phase solution autrement dit la solubilisation du bore décroît à cause de l'affaiblissement du pool extractible parvenu à la suite des précédentes élutions. Cette situation est moins aigue dans le sol de rendzine et le sol sur limon ayant une capacité tampon élevée et donc le HCl ne modifie pas tant le pH des éluats (Voir 3.4 élution du bore). OKAZAKI et CHAO (1968) ont trouvé une haute corrélation (r = 0,99) entre le pH et l'adsorption du bore dans le sol entre pH 4,0 et 7,0. VERLOO et al., (1980) ont rapporté que tous les éléments traces qui se comportent comme cations dans le sol sont plus solubles, lorsque le pH est faible tandis que ceux qui se trouvent comme anions, BO_3^{3-}, Mo_4^{2-} et SeO_4^{2-} sont plus solubles lorsque le pH est élevé. Ces auteurs ont rapporté aussi que l'hystèresie de l'adsorption - désorption des éléments traces réduit leur mobilité dans les sols qui est largement affectée par les propriétés des sols telles que leur teneur en matière organique, en argiles, leur texture et leur C.E.C.

Beaucoup d'auteurs n'ont qu'occasionnellement évoqué les interactions entre les oligoéléments comme paramètre affectant la mobilité de ces éléments, notre travail a montré que le manganèse apporté interfère avec le bore du sol pour décroître sa mobilité, cette interférence apparait surtout dans le sol sur limon et le sol sur alluvion en cas d'élution à l'eau (respectivement - 30 % et - 26 % de bore sont élués par rapport au blanc). Cet effet négatif du manganèse sur l'extraction du bore ajouté est confirmé lorsque le manganèse est ajouté avec le bore : dans ce cas nous avons constaté un effet systématiquement négatif

sur la mobilité du bore par rapport à celle en cas d'ajout de la même dose du bore mais sans le manganèse et ceci dans tous les sols même si cet effet varie dans son importence d'un sol à l'autre : l'extraction à l'eau du bore est diminuée plus pour le sol sur alluvion (-24%) que pour le sol sur limon (-17,5 %) et le sol de rendzine (-19,2%). L'extraction au DTPA et à l'Hcl montre un effet négatif encore plus prononcé; en cas d'extraction au DTPA elle décroît jusqu'à 53,7 % et 35,8% respectivement pour le sol sur alluvion et le sol sur limon tandis qu'elle décroît de 20,9 % pour le sol de rendzine. Il est inutile de rappeler l'importance qu'il faut prêter à ces résultats en cas de fertilisation pour éviter les ennuis dont ces interactions peuvent poser au développement des plantes, qui peuvent aller jusqu'à modifier leur nutrition (OLSEN, 1972). LONERGAN (1968) lorsqu'il a clarifié le sens de besoin nutritif, concentration critique et besoin nutritif fonctionnel a précisé que ces concepts sont spécialement pertinents avec les interactions des oligo-éléments. Cette influence du manganèse sur le bore pourrait être due à la compétition de l'adsortion des deux éléments sur les particules des sols, comme quand il y a adsorption, il y a automatiquement désorption (VERLOO etal., 1980). La désorption du manganèse ajouté (assez élevée comme nous l'avons constaté dans cette étude) serait accompagnée d'une adsorption du bore sur les sites d'adsorption dans les sols. Selon cette étude le bore ne semble pas être à l'image de certains métaux (Cd, Cu et Zn) qui passent par une adsorption initiale à la surface des particules des sols et qui sont en suite résistants à l'élution par l'eau (WOOD et BERRY, 1981). Nous avons trouvé que lorsque le bore est ajouté aux sols (20ppm) l'eau extrait le plus de ce bore en cas du sol sur alluvion (72,85 % contre 58,85 % en cas du sol sur limon et 55,3 % en cas du sol de rendzine). Ceci montre que le bore ajouté est moins fortement retenu par le premier sol que par les deux derniers; ce résultat est important pour la fertilisation en bore de ces sols et surtout du sol sur alluvion quand on sait que l'eau d'irrigation est plus pourvue en bore que dans le cas des deux autres sols. L'élution au DTPA pourrait donner une indication sur le bore absorbé par les plantes, nous verrons cela ailleurs dans cet ouvrage. L'élution à l'acide chlorhydrique parait moins intéressante à cet égard. GESTRING et SOLTANPOUR (1984) en essayant d'élargir l'intérêt de l'extraction au DTPA ont suspecté une telle relation.

5.5. Le manganèse.

Les deux expériences ont montré que l'élution à l'eau du manganèse dans les trois sols est très faible par rapport d'une part aux autres éluants et d'autre part au manganèse extractible à l'acide chlorhydrique 0,1 N (Tableau 25 Chapitre IV); il en va de même pour l'élution du manganèse ajouté qui parait assez bien dilué dans le système sol et qui en grande partie n'est pas extrait avec l'eau. La dynamique de cette mobilité par l'eau montre que l'équilibre est rapidement atteint puisque l'élution parait relativement constante jusqu'à la fin malgré la durée plus longue de contact entre l'eau et le sol à la fin.
Donc le manganèse ajouté pourrait être adsorbé sur les sites dans lesquels l'eau n'a pas de compétition d'absorption suffisante pour y déplacer le manganèse surtout en cas du sol de rendzine et du sol sur alluvion pour lèsquels le manganèse soluble à l'eau est très faible, ceci est en relation avec le pH et la fraction argileuse plus forte pour ces deux sols (voir résultats). Malgré une tendance au blocage du manganèse par le bore, cet effet net ne peut pas être decelé du fait des quantités très faibles du manganèse élué à l'eau. L'utilisation de ^{54}Mn montre une dilution complète du manganèse ajouté au manganèse du sol et transfert du manganèse ajouté à la phase solide, ce qui prouve que le manganèse élué à l'eau n'est pas le manganèse ajouté car nous n'avons détecté aucune radioactivité dans l'éluat à l'eau. L'extraction à l'eau n'est pas représentative du manganèse disponible pour les racines des plantes (VIETS et LINDSAY. 1973), mais une extraction à saturation peut représenter la pollution par cet élément de l'eau éluée d'irrigation ou de pluie; BRADFORD et al., (1971) l'ont utilisée pour 68 sols californiens pour montrer les différentes applications d'une telle extraction.

L'extraction au DTPA s'avère la plus intéressante pour les trois sols. En réalité depuis que LINDSAY et NORVELL en 1967 ont utilisé ce réactif, celui-ci est de plus en plus utilisé. Il complexe les ions de la solution du sol, l'activité de ces ions baisse et la phase solide libère des ions rétablissant l'équilibre du milieu. Ainsi, plus le sol peut libérer des ions manganèse plus le DTPA est capable de l'extraire, et l'on sait qu'audessus de pH 7,0 le complexe soluble MnDTPA est extrait de la matière organique, or 84 à 99 % de manganèse déplacé dans la solution du sol est présent dans la matière organique

(FOLLETT et al., 1981). On comprend ainsi le taux élevé du manganèse extrait du sol de rendzine qui est le plus riche en matière organique avec un pH de 7,9.

La cinétique de l'extraction du manganèse stable et radioactif varie d'un sol à l'autre en fonction de la capacité du sol de rétablir l'équilibre en libérant des ions manganèse pour compenser ceux élués dans l'éluat précédent. Nous constatons en général grâce aux résultats obtenus dans les études de radioactivité une décroissance d'extraction du manganèse ajouté, surtout au dernier prélèvement.

Cette décroissance est observée aussi pour l'extraction à l'acide de chlorhydrique qui commence forte pour décroître régulièrement jusqu'à la fin même lorsque l'acide chlorhydrique baisse le pH des éluats. Cette extraction à l'acide chlorhydrique, plus faible que celle en DTPA est en relation positive avec le pH car c'est du sol sur limon dont le pH est le plus faible que l'acide chlorhydrique extrait le plus.

La vitesse de l'élution, qui varie également d'un sol à l'autre et d'un éluat à l'autre, joue un rôle dans la variation de la cinétique de l'extraction.

Notre étude a montré un effet dépressif, très peu signalé par d'autres, du bore sur l'extraction du manganèse dans tous les cas. Cet effet est plus important dans le cas d'élution au DTPA du fait de la présence de la majeure partie du manganèse extractible dans le sol après l'élution à l'eau qui n'extrait qu'une partie minime du manganèse du sol ou ajouté. Cet effet varie dans son importance d'un sol à l'autre : l'extraction au DTPA du sol sur limon décroît de 20,2 % en cas d'ajout du bore et de 14,2 % en cas d'ajout du bore et du manganèse à la fois. Pour le sol sur alluvion cette décroissance est respectivement du même ordre soit : 21,4 % et de 25,7 % et pour le sol de rendzine (également dans le même ordre) est respectivement de 12,1 % et de 11,8, ces effets sont en relation significative avec l'adsorption compétitive des éléments (MURALI et AYLMORE, 1983). Nous constatons que l'effet du bore est plus important pour le sol sur alluvion que dans le cas des deux autres sols et qu'il est le moins important pour le sol de rendzine dont l'effet du manganèse sur l'extraction du bore était moins important aussi. Nous soulignons que la teneur totale du sol de rendzine de ces deux éléments est plus faible que celles des deux autres sols et que ce sol est plus riche en matière organique. D'SOUZA et MISTRY (1978)

ont montré que le ^{54}Mn était immobilisé par la matière organique ajoutée au sol feralitique et au sol vertique et qu'une partie importante de ^{54}Mn restait dans le sol après l'élution à l'eau au EDTA 0,01M.

L'élution à l'acide chlorhydrique 0,1 N est de loin la plus proche de l'extraction du manganèse à l'acide chlorhydrique 0,1N pratiquée pour connaître les oligoéléments extractibles dans les sols expérimentés.

Le manganèse selon nos résultats est plus mobile en général que le fer malgré sa teneur beaucoup plus élevée. Des interactions entre ces deux éléments ont été signalées (OLSEN, 1972; VIETS et LINDSAY, 1973;FOLLETT et al., 1981; HEENAN et CAMPBELL, 1983 ...).

Dans la cinétique de la diffusion du manganèse dans les sols, le ^{54}Mn nous a permis sans perturber le système de constater une immobilité importante du manganèse dans la couche superficielle du sol des colonnes; elle ne varie guère jusqu'à la fin de l'élution à l'eau, 10 cm plus bas elle décroît de 80%. A la fin de l'élution au DTPA et à l'acide chlorhydrique,bien qu'elle ait successivement beaucoup baissé, la radioactivité ésiduelle est accumulée toujours en surface (0-5cm), d'une façon disproportionnelle avec le fond des colonnes, ce qui nous autorise à dire que le manganèse, en l'absence de l'effet d'élution, diffuse peu dans le sol, c'est-à-dire que "l'autodiffusion" du manganèse est faible. Parmi les trois sols, c'est le sol sur alluvion qui retient dans la couche superficielle le plus de ^{54}Mn. Nous avons constaté qu'il retient aussi le plus de manganèse stable ajouté. D'SOUZA et MISTRY (1978) ont montré que dans un sol feralitique et un sol vertique le ^{54}Mn ^{59}Fe, ^{65}Zu et ^{58}Co sont retenus presque totalement à la surface du sol (0-2,5 cm),même après l'élution à l'eau, mais que le 0,01 M EDTA cause un mouvement important de ^{65}Zn et de ^{59}Fe tandis que le ^{54}Mn, et le ^{59}Co sont toujours concentrés à la surface de ces deux sols. SINGH (1974) a rapporté que la diffusion du manganèse est en relation avec le pH, la migration de la fraction argileuse et les conditions d'oxydo-réduction des sols, Le pH élevé et l'indice de stabilité structurale très mauvais pourraient expliquer la rétention plus forte de ^{54}Mn dans le sol sur alluvion.

Le coefficient d'élution de radioactivité a défini la nature du manganèse extrait donnant, par la quantité de manganèse élué, l'impression que la totalité du manganèse ajouté est extraite. Ce coefficient

élevé n'a jamais dépassé la totalité de la radioactivité introduite et en est même loin dans le cas du sol sur alluvion; ce qui montre que lorsqu'il y a extraction supérieure à la totalité du manganèse ajouté, il y a sûrement une quantité du manganèse naturel du sol qui est élué, ce qui augmente la quantité totale et entraîne une ambiguité dans le résultat obtenu; seul le ^{54}Mn est capable de clarifier cette équivoque. D'autres résultats moins importants se dégagent et ont été donnés dans l'alinéa 4.7 de ce chapitre.

La RAS confirme la relation entre manganèse ajouté et élué et le rôle indiscutablement moins important de l'élution à l'acide chlorhydrique par rapport à celle au DTPA, enfin elle rend compte des différences des cinétiques d'élution de ^{54}Mn entre les éluats, cinétique d'ailleurs pas différente de celle du manganèse stable. La RAS montre qu'il n'y a pas de pool homogène de manganèse injecté au sol et celui préexistant au sol.

Tous ces résultats et le chevauchement entre le manganèse élué dans le cas du blanc et dans le cas des traitements avec ajout de manganèse laisse penser que : le manganèse ajouté ne se mélange pas d'une façon homogène avec le manganèse du sol et que l'adsorption compétitive des ions manganèse peut être en relation avec plusieurs paramètres (concentration de la solution, pH ...) (MURALI et AYLMOR, 1983) et rendre l'élément ajouté en partie moins mobile que le manganèse du sol.

V 6 - CONCLUSION.

L'élution sur colonne considérée encore comme un modèle du mouvement naturel des solutés dans les sols; a permis d'étudier la capacité des sols experimentés à retenir les éléments nutritifs ajoutés ou préexistants. L'échange et la dilution entre ceux ajoutés et ceux préexistants dans les sols et les interactions entre les éléments ajoutés et ceux des sols. L'élution a permis de montrer également la potentialité de plusieurs éluants à extraire les différents éléments et par suite à donner des indications intéressantes sur ce qu'on peut appeler "la capacité de réserve" des sols; Les éléments drainés hors des sols peuvent s'accumuler dans les eaux de la nappe par une partie et qui sont précipités dans des horizons plus profonds des sols pour une autre partie. Nos résultats ont montré d'autre part la nécessité de tenir compte de plusieurs paramètres pour donner des prévisions sur la fertilité des sols; ces paramètres varient d'un sol à l'autre et d'un élément à l'autre. Nous avons pu étudier la cinétique de l'élution des différents éléments pour les trois sols étudiés. Pour certains éléments cette élution peut, selon les éluants, être en relation avec les éléments extractibles estimés par d'autres méthodes d'extraction. L'utilisation de ^{54}Mn s'est montrée indispensable pour étudier la diffusion de manganèse dans le sol sans perturber le milieu, et préciser la nature du manganèse extrait. Le ^{54}Mn nous a montré aussi que la totalité du manganèse ajouté ne s'échangerait pas d'une manière homogène avec le manganèse préexistant dans le sol. Enfin, ce type d'expérience malgré son importance ne remplace dans aucun cas les essais sur la plante qui restent décisifs pour évaluer les éléments assimilables des sols. Cependant pour des raisons pratiques et à cause des différences très importantes des besoins nutritifs entre les espèces, les variétés et même les cultivars, nous avons fait recours à ce type d'expériences comme test de sol qui doivent être considérées comme complémentaires mais néanmoins essentielles.

CHAPITRE VI

FERTILISATION EN BORE ET EN MANGANESE ET CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES PLANTES.

CHAPITRE VI

FERTILISATION EN BORE ET EN MANGANESE ET CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES PLANTES.

Nous présentons dans ce chapitre quelques aspects sur la croissance et le développement des plantes ainsi que sur les symptômes qu'elles présentent lorsqu'elles sont soumises aux différents traitements. Nous essayerons par la suite de montrer comment ces aspects peuvent être utilisés comme critères pour le diagnostic d'une maladie nutritionnelle.

VI - 1 - *CROISSANCE*

1.1. Croissance générale.

Les observations sont consignées dans le tableau 1. le sol a un effet sur la croissance : ce sont les plantes du sol sur alluvion qui accusent la croissance la moins bonne.

Il ressort que les plantes ayant reçu une fertilisation complète (témoin) ont la meilleure croissance à tous les points de vue. Un apport de 3 ppm du bore ou de 6 ppm de manganèse ne montre par ailleurs aucun effet sur la croissance.

Tous les autres traitements se traduisent par une réduction de la croissance qui peut avoir deux origines opposées :

- soit d'une part, en l'absence d'apport en bore et manganèse et surtout en l'absence de toute fertilisation.
- soit d'autre part, lorsque les apports sont excessifs.

Il est à remarquer que ce sont les effets des doses les plus fortes en bore et en manganèse qui sont les plus important.

Ces observations sont confirmées par les photos (fig.45, 47 48, 51 et 52).

Tableau 25 : Observations générales sur la croissance des plantes cultivées sur trois types de sols et recevant différents traitements fertilisants.

SOL / Fertilisants	S.R.	S.L.	S.A.
Témoin	Meilleure croissance + + +	Idem + + +	Idem + +
Blanc	Croissance très réduite - - -	Idem - - -	Idem - -
- B et Mn	Croissance peu réduite - - -	Idem - - -	*
Bx6	Croissance normale + + +	Idem + + +	Idem + +
Mnx6	Croissance normale + + +	Idem + + +	Idem + +
B x 11	Croissance réduite - - -	Idem - - -	*
Mn x 11	Croissance réduite - - -	Idem - - -	*
B x 16	Croissance très réduite - - -	Idem - -	Idem - -
Mn x 16	Croissance très réduite - - -	Idem - -	Idem - -

Légende : S.R = Sol rendzine. S.L. = Sol sur limon. S.A.= sol sur alluvion...

Témoin = apport de tous les éléments nutritifs en taux usuels.

Blanc = sans apport d'aucun élément nutritif.

- B et Mn = apport de tous les éléments sauf le bore et le manganèse.

B X 6 = apport de bore à la dose 6 fois plus forte que le témoin. (3ppm du bore)

Mn X 6 = apport de manganèse à la dose 6 fois plus forte que le témoin (6ppm du manganèse).

B X 11 = apport de 5,5ppm du bore

Mn X 11 = apport de 11 ppm du manganèse

B X 16 = apport de 8,0 ppm du bore.

Mn X 16 = apport de 16,oppm du manganèse

* = traitements absents dans l'expérience sur ce sol.

Les signes + et - permettent une comparaison uniquement à l'intérieur du même traitement.

1.2. Nombre de feuilles et croissance de limbes.

1.2.1. Nombre de feuilles.

Nous avons regroupé dans le Tableau 36 le nombre de feuilles formées sur le maître brin pour tous les traitements et les trois sols.

Tableau 36 : Nombre total de feuilles formées sur le maître brin en fonction des sols et des traitements.

SOL / Traitement	S.R.	S.L.	S.A.
Témoin	7 à 8	7 à 8	7 à 8
Blanc	6 à 7	7 à 8	6 à 7
- B et Mn	7 à 8	7 à 8	*
B X 6	7 à 8	7 à 8	7 à 8
Mn X 6	7 à 8	7 à 8	7 à 8
B X 11	7 à 8	7 à 8	*
Mn X 11	7 à 8	7 à 8	*
B X 16	6 à 7	6 à 7	6 à 7
Mn X 16	7 à 8	7 à 8	7 à 8

Nous constatons d'après ce tableau que le nombre de feuilles est généralement compris entre 7 et 8. Néanmoins, ce nombre est réduit soit sous l'influence d'une carence (Blanc) sauf pour le sol sur limon soit sous l'influence d'une toxicité en bore. Contrairement au bore la toxicité en manganèse ne modifie pas le nombre de feuilles.

1.2.2. Croissance des limbes.

Cette étude a porté sur la première expérience à partir du sol brun lessivé sur limon et sol de rendzine. Les mesures concernent les longueurs finales des limbes des différentes feuilles du maître brin.

1-2-2-1 - Croissance des limes des plantes cultivées sur sol brun lessivé sur limon.

On constate (fig.53et 54) que la longueur des limbes varie avec l'ordre de la feuille, sur le témoin (avec apport de tous les éléments nutritifs) par exemple cette longueur augmente régulièrement jusqu'à la cinquième ou la sixième feuille puis diminue jusqu'à la dernière feuille.

Nous constatons d'après la figure 54 que tous les traitements appliqués diminuent d'une façon plus ou moins marquée la longueur de tous les limbes. La diminution est peu sensible pour les premières feuilles, celà étant probablement dû au fait qu'elles sont déjà présentes dans la semence, mais elle devient très significative à partir de la quatrième. La cassure est particulièrement importante pour le blanc (plantes sans ajout d'aucun élément nutritif), mais se manifeste également lorsqu'on assiste à des phénomènes de toxicité aiguë (apport de 16,0 ppm du manganèse ou de 8,op.p.m de bore, figure53). Il est à noter que la longueur des limbes à partir de la sixième feuille est plus affectée par un apport de 8 ppm du bore que par un apport de 16 ppm du manganèse.

1-2-2-2 - Croissance des limbes des plantes cultivées sur sol rendzine sur calcaire.

Des observations tout à fait comparables sont faites à partir des essais sur sol de rendzine, les résultats sont illustrés par les figures 55 et 56. Tous les traitements des essais sur ce sol ont des effets voisins de ceux des essais sur sol brun lessivé sur limon. A partir de cinquième feuille la longueur des limbes est plus affectée par 8 ppm du bore que par 16 ppm du manganèse (fig.55).

Pour les deux sols, la mesure des largeurs des limbes (résultats non rapportés) conduit à des conclusions analogues , même si sur sol sur limon les limbes sont en général moins larges.

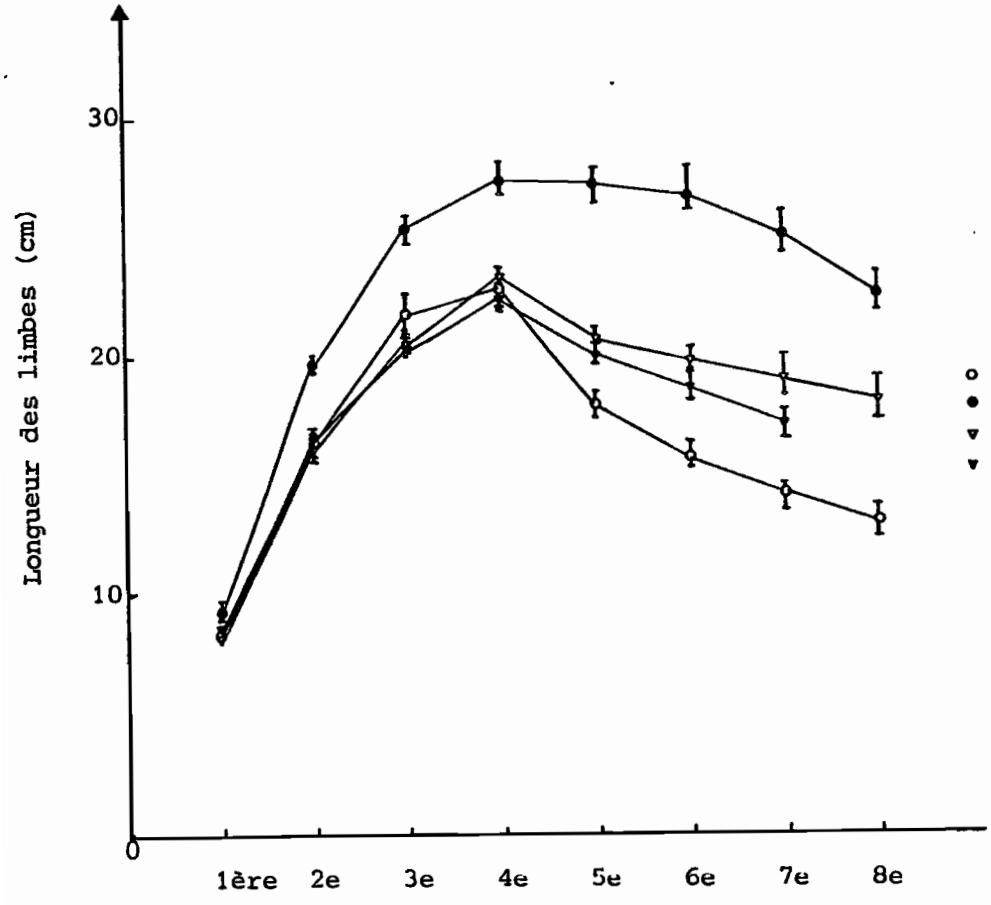


Figure 53 - Influence de divers traitements fertilisants sur la longueur du limbe des différentes feuilles de blé cultivé sur sol brun lessivé sur limon.

o Blanc (sans apport d'aucun élément nutritif).
● Témoin (avec apport de tous les éléments nutritifs).
▾ MnX16 (avec apport de 16,opp.m du manganèse).
▾ BX 16 (avec apport de 8,oppm du bore).

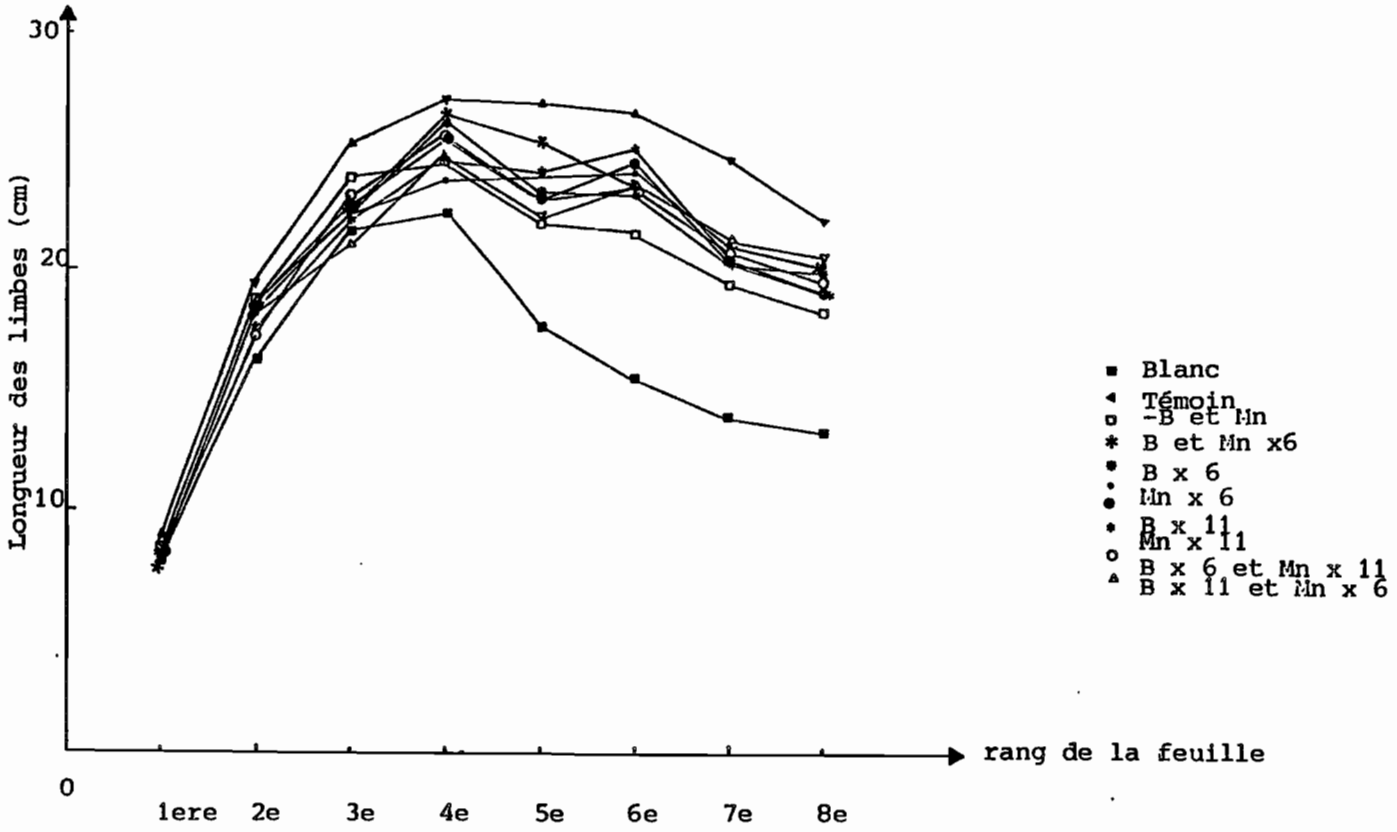


Figure 54 - Influence des divers traitements fertilisants sur la longueur du limbe des différentes feuilles du blé cultivé sur sol brun lessivé sur limon.

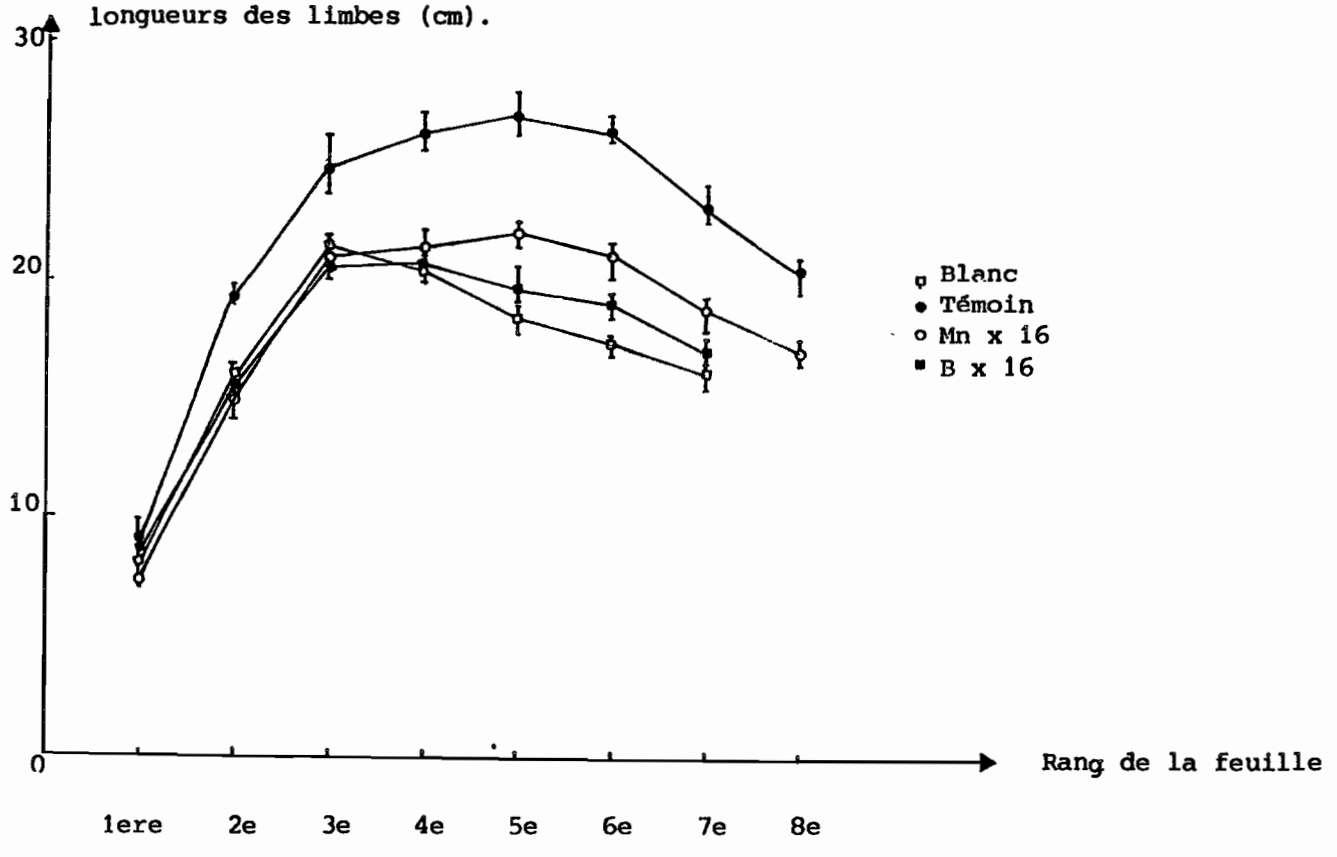


Figure 55 : = Influence de divers traitements fertilisants sur la longueur du limbe des différentes feuilles du blé cultivé sur sol rendzine sur calcaire.

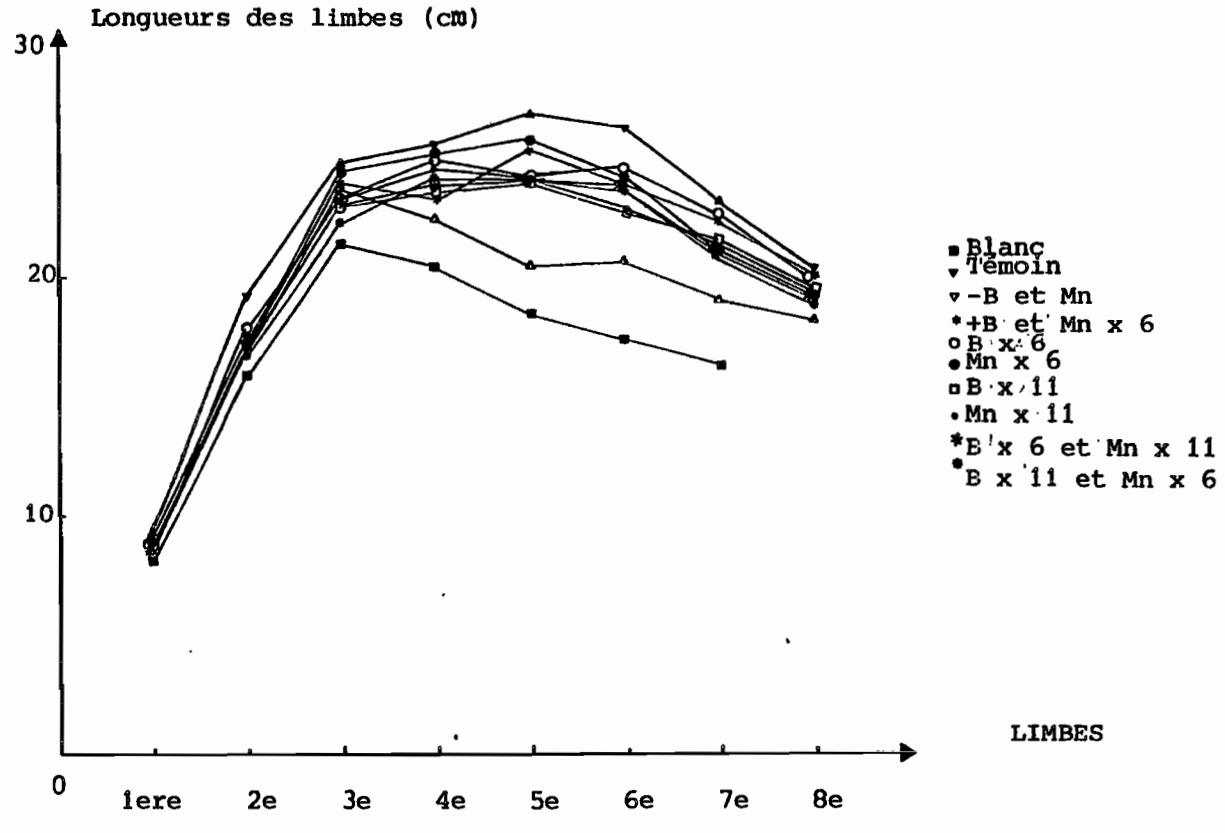


Figure 56 - Influence des divers traitements sur la longueur du limbe des feuilles de blé cultivé sur sol rendzine sur calcaire.

1.3. Tiges.

Les observations faites sur la longueur et le diamètre des tiges sont rapportées dans le tableau 3 et sur les photographies (fig. 45, 48, 52)

Nous voyons que les plantes témoins ont les tiges les plus longues mais, parmi les trois sols ce sont les plantes du sol sur alluvion qui ont les tiges les plus courtes. L'absence de toute fertilisation ou la fertilisation en très forte dose en bore ou en manganèse diminuent fortement la croissance de tiges; néanmoins, c'est la forte dose de bore (B x 16) qui réduit le plus la dimension des tiges en particulier sur sol brun lessivé. D'ailleurs ce sont les tiges des plantes de ce sol qui sont les plus affectées par les fortes doses en bore et en manganèse.

Des conclusions parallèles peuvent être tirées en considérant les diamètres des tiges.

Nous voyons sur les photographies (fig. 45, 48, 52) que les phénomènes de toxicité se traduisent surtout par une nette diminution de la longueur du dernier entre-noeud (col de l'épi), alors que le phénomène de carence ne l'affecte pas particulièrement.

Tableau 37- Tableau synoptique de l'effet de divers traitements sur la longueur et le diamètre des tiges de blé cultivé sur les trois types de sols. (La légende est celle du tableau 35.

	LONGUEUR			DIAMETRE		
	S.R	S.L.	S.A.	S.R	S.L	S.A
Témoin	Les plus longues + + + +	Idem + + +	Idem + +	Les plus épaisses + + +	Idem + +	Idem + +
Blanc	Très courtes - - -	Idem - - -	Idem - -	Mince - - -	Idem - - -	Idem - -
- B et Mn	Courtes - - -	Idem - - -	*	Mince - - -	Idem - - -	*
B X 6	Longues + + +	Idem + + +	Idem + + +	Large + + +	Idem + + +	Idem + +
Mn X 6	Longues + + +	Idem + + +	Idem + + +	Large + + +	Idem + + +	Idem + +
B X 11	Courtes - - -	Idem - -	*	Peu large + + +	Idem + +	*
Mn X 11	Courtes - - -	Idem - -	*	Peu large + + +	Idem + +	*
B X 16	Les plus courtes - - -	Idem - -	Idem - - -	Les plus minces - - -	Idem - -	Idem - - -
Mn X 16	Très courtes - - -	Idem - -	Idem - - -	Très mince - - -	Idem - -	Idem - - -

VI - 2 - DEVELOPPEMENT

2.1. Epiaison et floraison.

Nous constatons d'après le tableau 38 que la nature des sols influence peu la date de l'épiaison et de la floraison (à l'exception du blanc du sol sur limon dont la floraison est un peu tardive) alors que la fumure peut avoir des effets notables. L'absence de fertilisation conduit à une floraison plus précoce tandis que tous les autres traitements au contraire la retardent.

Les retards les plus considérables sont constatés lorsque les apports de manganèse et de bore sont très élevés (voir tableau 38). Il en résulte que la carence et la toxicité ont des effets opposés sur la floraison et l'épiaison alors que nous avons vu au paragraphe 1-1 qu'elles pouvaient avoir le même effet sur la croissance.

2.2. Nombre d'épillets totaux et stériles.

La nature du sol peut influencer le nombre d'épillets totaux puisque ces derniers sont sensiblement moins nombreux sur sol sur alluvion, cependant le nombre d'épillets stériles (qui ne contiennent pas de grains) n'est pratiquement pas affecté par la nature du sol (voir tableau 39). La fertilisation joue un rôle important tant sur le nombre d'épillets totaux que sur celui d'épillets stériles. Les plantes du témoin (qui ont reçu une fertilisation complète) sont celles qui présentent dans tous les cas le plus grand nombre d'épillets. Par contre les plantes carencées (blanc) ou très intoxiquées sont celles qui présentent le plus faible nombre d'épillets. Cette carence ou cette toxicité se répercutent également sur le nombre d'épillets stériles qui dans ces cas sont toujours anormalement élevés. La toxicité en bore affecte plus le nombre d'épillets totaux que la toxicité en manganèse alors que ces toxicités augmentent de manière sensiblement identique le nombre d'épillets stériles.

Tableau 38- Précocité de la floraison et de l'épiaison selon le type de sol et les divers traitements.

	EPIAISON			FLORAISON		
	S.R.	S.L.	S.A.	S.R.	S.L.	S.A.
Témoin	Témoin	Témoin	Témoin	Témoin	Témoin	Témoin
Blanc	- 5	- 4	- 7	- 2 à 3	- 2 à 3	- 2 à 3
- B et Mn	+ 2 à 3	+ 2 à 3	*	+ 2 à 3	+ 2 à 3	*
B x 6	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3
Mnx6	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3	+ 2 à 3
Bx11	+ 4 à 5	+ 4 à 5	*	+ 4 à 5	+ 4 à 5	*
Mnx11	+ 4 à 5	+ 4 à 5	*	+ 4 à 5	+ 4 à 5	*
Bx16	+ 6 à 7	+ 6 à 7	+ 6 à 7	+ 6 à 7	+ 6 à 7	+ 6 à 7
Mnx16	+ 6 à 8	+ 6 à 8	+ 6 à 8	+ 6 à 8	+ 6 à 8	+ 6 à 8

Légende : Avance (-) ou retard (+) exprimé en jour à l'épiaison et à la floraison comparé au témoin

* : la légende est celle du Tableau 35.

Tableau 39- Nombre d'épillets totaux et stériles sur les épis des maîtres brins en fonction du sol et des traitements reçus.

	NOMBRE D'EPILLETS TOTAUX			NOMBRE D'EPILLETS STERILES		
	S.R.	S.L.	S.A.	S.R.	S.L.	S.A.
Témoin	16 à 20	16 à 20	12 à 14	2	2	2
Blanc	10 à 12	10 à 12	8 à 10	4	4	4
- B et Mn	12 à 14	12 à 14	*	2	2	*
B x 6	14 à 16	14 à 16	12 à 14	2 à 4	2 à 4	2 à 4
Mnx6	14 à 16	14 à 16	12 à 14	2 à 4	2 à 4	2 à 4
Bx11	11 à 14	11 à 14	*	2 à 4	2 à 4	*
Mnx11	11 à 13	11 à 13	*	2	2	*
Bx16	10 à 12	10 à 12	8 à 10	4 à 6	4 à 6	4
Mnx16	12 à 14	12 à 14	8 à 10	4 à 6	5 à 6	4

La légende est celle du tableau 35.

VI - 3 - SYMPTOMOLOGIE

3.1. Symptomologie générale.

Ce sont les plantes du témoin qui pour tous les sols accusent la meilleure végétation (voir fig. 5 et48), néanmoins parmi ces dernières celles du sol sur alluvion sont les plus faiblement développées.

Dans le cas d'absence de fertilisation (Blanc), les plantes manifestent certains symptômes;on observe le jaunissement puis le brunissement des bouts et des bords des limbes; le limbe de la sixième feuille se couvre rapidement de nécroses avec des taches jaunes sur un fond vert. Ces symptômes ne sont pas constatés sur sol brun lessivé où les limbes des trois dernières feuilles restent vert foncé à l'exception toutefois de leurs extrémités. Ils sont également peu accusés en cas d'absence d'apport de bore et de manganèse (voir fig.45).

Les symptômes provoqués par des excès de bore de manganèse sont les suivants : le bore avec 3 ppm ne provoque pas des symptômes caractéristique (voir fig.46),mais avec 5,5 p p m les limbes commencent à manifester une chlorose sur les extrémités et les marges puis, ils accusent des nécroses marginales et apicales avec des taches brunes. Leur verdure est moins accentuée que celle du témoin, sur les marges des limbes on distingue des zones brunes à l'intérieur desquelles se situe une zone jaune claire.

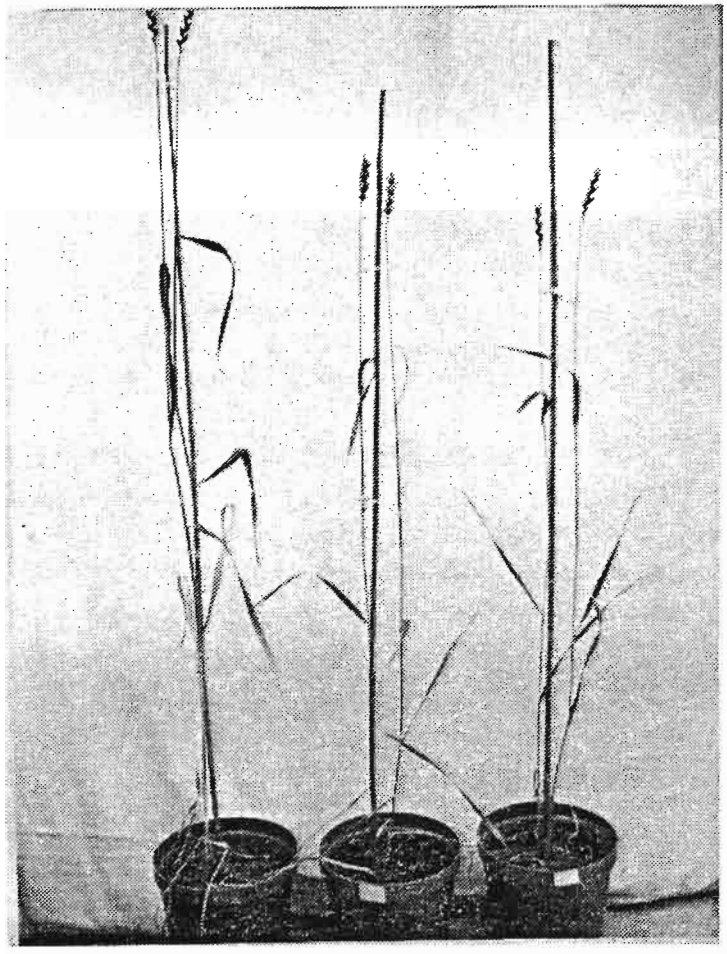


Figure 45- plantes au cours de la maturation des grains (de droite à gauche) plantes témoins, plantes avec apport de tous les éléments nutritifs sauf le bore et manganèse et plantes da blanc (sans ajout d'aucun élément nutritif).

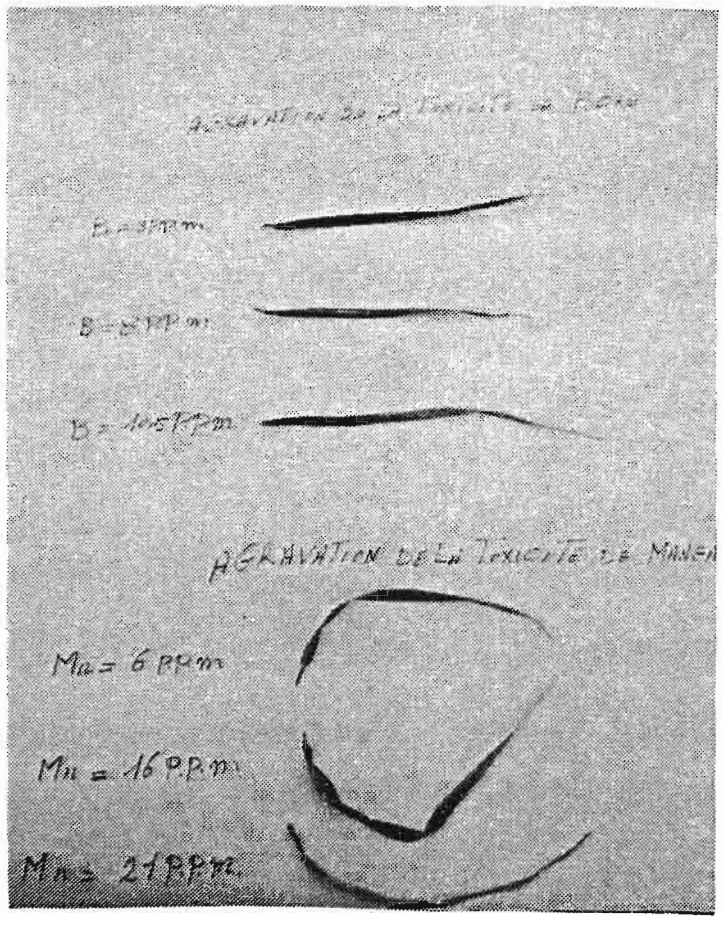


Figure 46 - Limbes de feuilles de blé prélevés surdes plantes ayant reçu diverses doses de bore et de manganèse et présentant des symptômes de toxicité.

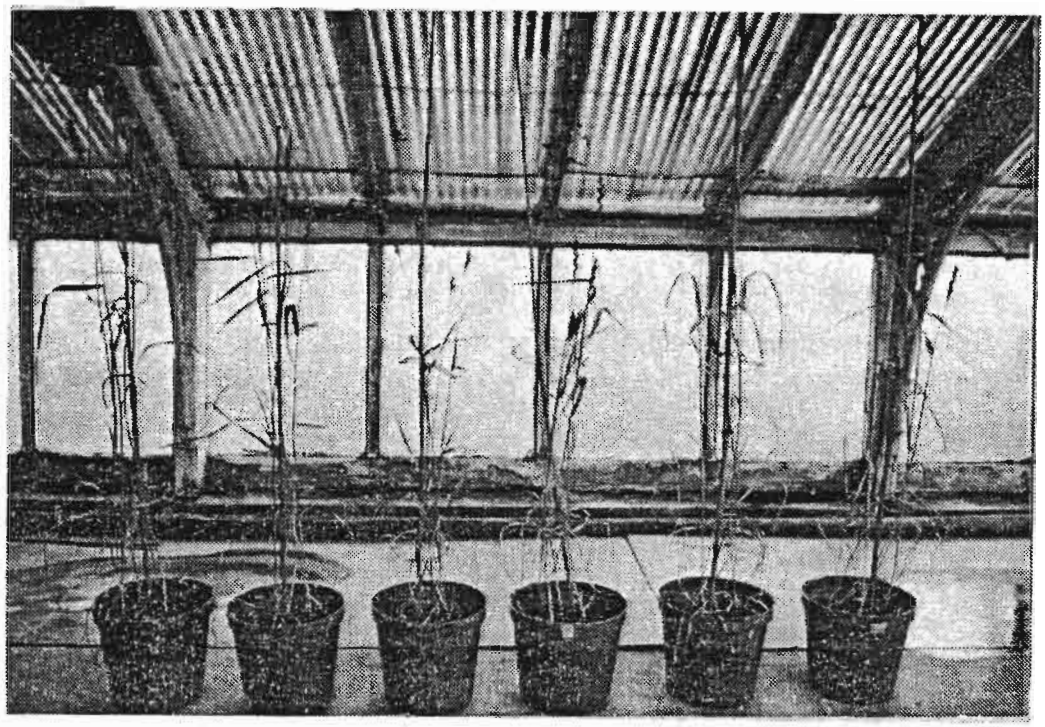


Figure 47- Plantes sur sol sur alluvion au cours de la maturation des grains. de droite à gauche : témoin du sol sur limon,témoin du sol sur alluvion,blanc, apport de 3ppm de B et 6ppm de Mn, apport de 8 ppm de B, apport de 16ppm de Mn.

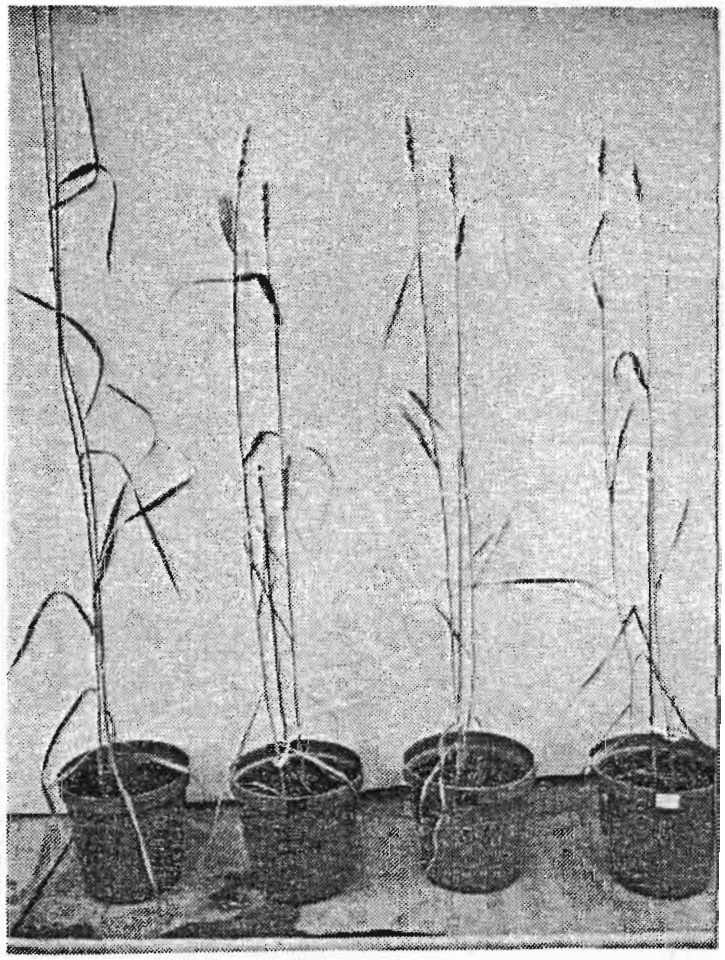


Figure 48 - Plantes sur sol sur limon au cours de la maturation des grains. de droite à gauche : pot témoin, deux pots avec apport de 8,0 ppm de bore, pot blanc (sans aucun apport).

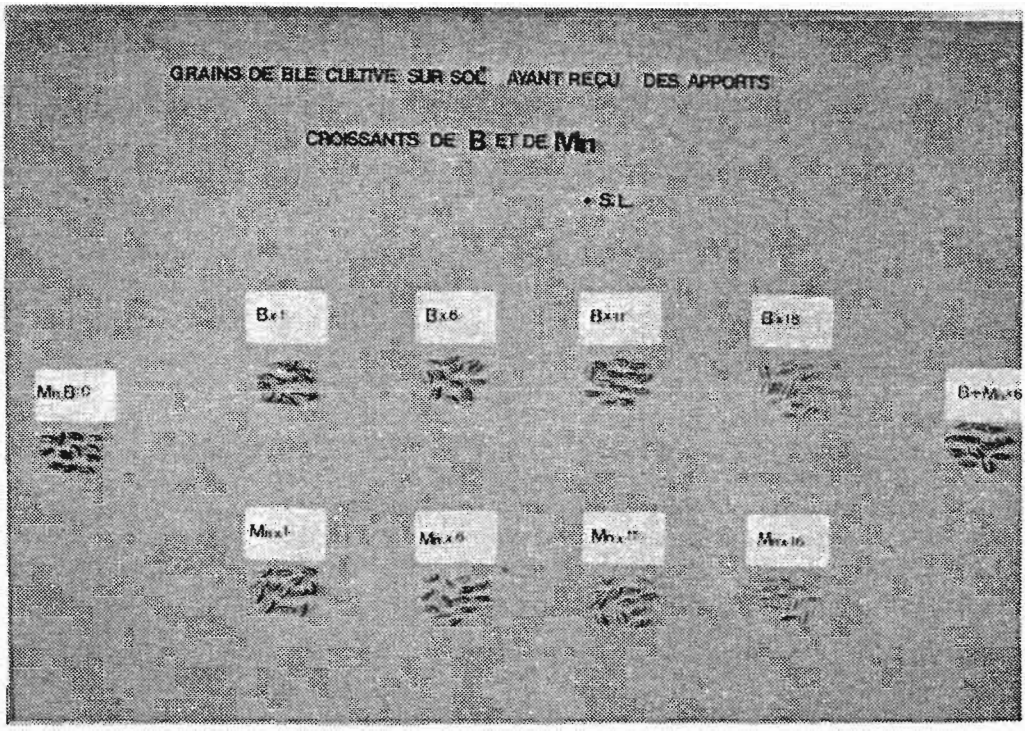


Figure 49 - S.L = sol brun lessivé sur limon.

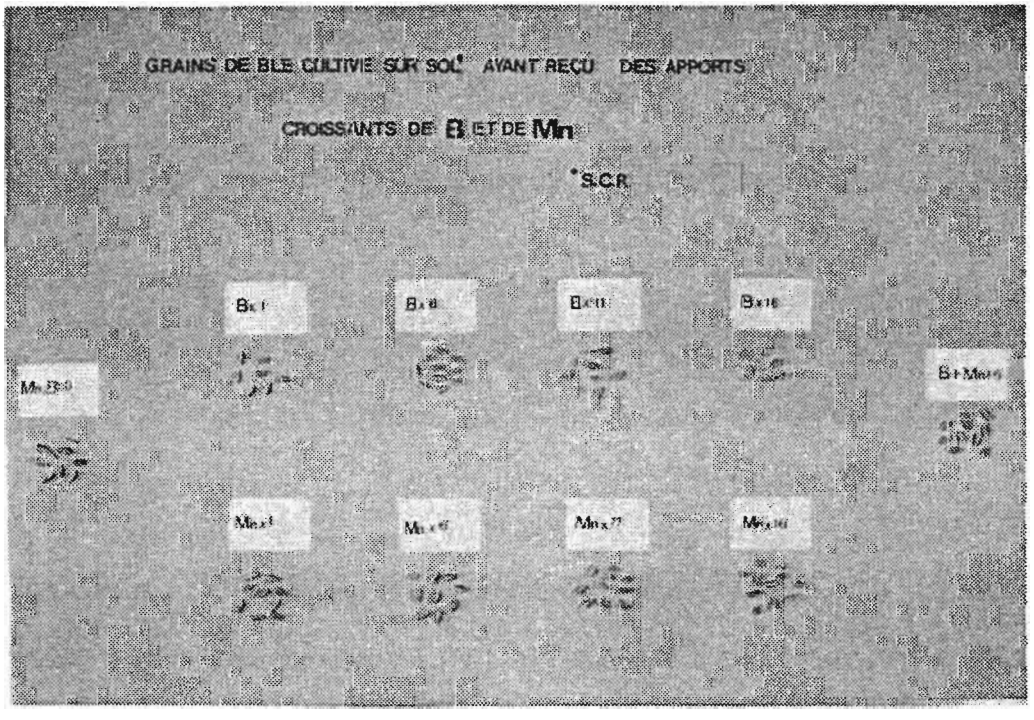


Figure 50 - S.C.R = sol renzine sur calcaire.

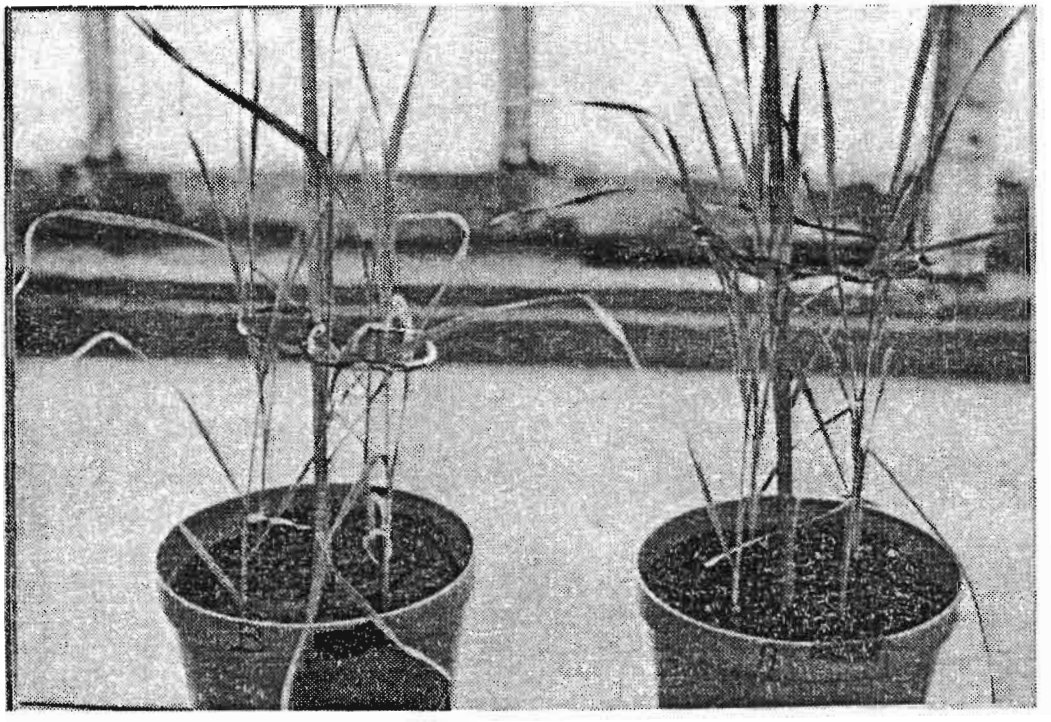


Figure 51 - Plantes au stade 4 feuilles montrant l'effet de toxicité en manganèse sur deux types de sol :

A : sol de rendzine

B : sol sur limon).

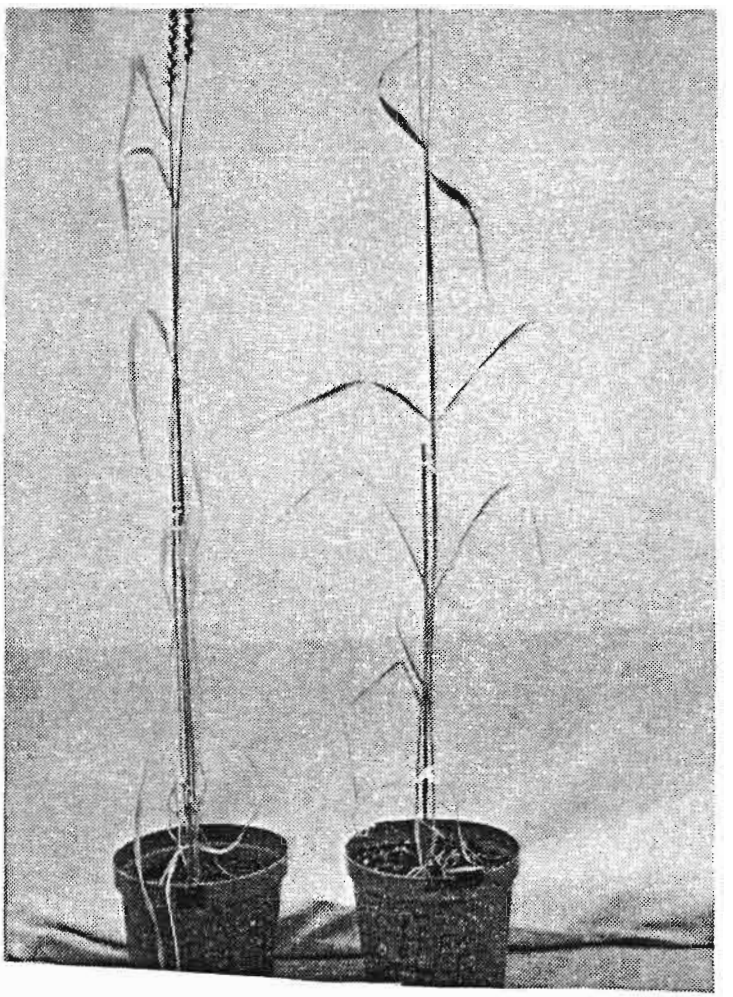


Figure 52 - Plantes au cours de la maturation des grains montrant l'effet de toxicité en bore sur deux types de sol(à droite sol sur limon, à gauche sol de rendzine).

Avec 8 ppm du bore : la nécrose se manifeste d'abord sur les parties apicales des limbes puis se généralisé rapidement sur l'ensemble. Des taches brunes très allongées s'observent sur les limbes (voir limbes (voir fig.46) ces symptômes sont plus accusés en cas du sol sur limon (fig.52). Les épillets présentent des taches brunes apicales et les grains sont très affectés (petits, minces et ridés) surtout dans le cas du sol sur limon (fig.49 et 50) . Sur sol de rendzine où pour la deuxième expérience la dose du bore a été augmentée à 10,5ppm, ces symptômes sont encore plus accentués (voir fig.46.

Le manganèse au taux de 6 ppm ne provoque pas de symptôme excepté un brunissement apical des limbes qui suit le sens de veination accompagné d'un léger enroulement. Avec 11 ppm du manganèse, les limbes sont enroulés dès leur sortie, une moitié en largeur étant chlorosée jusqu'à la gaine tandis que l'autre moitié ne l'est qu'à l'extrémité. La dose de 16 ppm de manganèse provoque à partir d'un stade végétatif précoce une chlorose surtout sur les plantes du sol sur limon (voir fig.51 et 52), la photo (fig.46) montre les symptômes de cette toxicité sur les limbes et surtout en cas de sol rendzine où une dose de 21 ppm est apportée pour la deuxième expérience. Sous l'effet de cette dose les limbes présentent aussi à leurs extrémités des taches auréolées blanchâtres au milieu et brunes sur les bords. Dans ce cas on obtient de petits grains étriqués, ridés, de couleur plus claire surtout dans le cas du sol sur limon (voir fig. 49 et 50).

3.2. Teneur en chlorophylles.

Les chlorophylles pigments actifs de la photosynthèse existent chez les plantes supérieures sous les deux formes a et b.

Ayant constaté l'influence du bore et du manganèse apportés à fortes doses sur la couleur des feuilles de blé, nous avons recherché dans ces plantes les teneurs en chlorohylles: a et b sur le sol sur limon d'une part et sur le sol de rendzine d'autre part.

Les résultats sont consignés dans le tableau 40, nous constatons que les teneurs en chlorophylle a et b du témoin sont analogues sur les deux sols. Que les plantes soient cultivées sur sol de rendzine ou sur sol sur limon, on constate une diminution importante aussi bien de la chlorophylle "a" que de la chlorophylle "b" lorsqu'on apporte

le bore et le manganèse à des doses très toxiques. Cette diminution est comprise entre 31 et 44 %. Les effets de ces deux éléments ne sont pas très différents contrairement à ceux produits sur les autres caractéristiques biologiques.

La teneur en chlorophylle a semble plus affectée en sol sur limon qu'en sol de rendzine alors que l'effet est inverse pour la chlorophylle b .

Tableau 40 - Effet du manganèse et du bore sur les teneurs en chlorophylles a et b exprimées en mg/g de matière fraiche.

BLE CULTIVE SUR SOL BRUN LESSIVE SUR LIMON.					
	Plante témoin	Plante avec apport de 16 ppm de Mn	Baisse en %	Plante avec apport de 8,oppm de B	Baisse en %
Chlorophylle (a) mg/g	20,7	12,1	41,5	11,5	44,4
Chlorophylle (b) mg/g	0,64	0,40	37,5	0,44	31,3
BLE CULTIVE SUR SOL RENDZINE SUR CALCAIRE.					
	Plante témoin	Plante avec apport de 21 ppm de Mn	Baisse en %	Plante avec apport de 10,5ppm de B	Baisse en %
Chlorophylle (a) mg/g	19,7	12,7	35,5	13,0	34,0
Clorophylle (b) mg/g	0,71	0,43	39,4	0,46	35,2

IV - 6 - INTERPRETATION

Nous avons observé qu'une dose de 3 ppm de bore ou de 6 ppm de manganèse ne provoque pas de symptôme net , alors que des doses de 8 ppm de bore ou de 16 ppm de manganèse ou encore une combinaison de ces deux doses les accentuent fortement. Cette accentuation des symptômes en fonction des doses apportées pourrait s'expliquer par l'évolution de l'effet sur les cellules de la toxicité du bore ou du manganèse et même par l'intéraction entre eux. Ces symptômes correspondent souvent, selon BUSSLER (1981) à des stades avancés de décomposition de la substance de la plante. Ils peuvent être, d'après ce même auteur, imputés à trois facteurs : 1 - La constante de stabilité des liens chimiques compétitifs des éléments. 2 - La réversibilité de la complexation des éléments avec les proréines enzymatiques et 3 - à la localisation des oligoéléments dans les différents organes, tissus et cellules. Cependant nous ne pouvons pas négliger l'influence des caractéristiques des sols qui peuvent modérer selon les cas l'effet d'un apport important. L'effet visuel des mêmes apports en bore ou en manganèse est plus accusé sur le sol sur limon à pH relativement bas (5,3), à texture pauvre en argile et en limon fin et à capacité d'échange plus faible que sur le sol de rendzine. Tous ces facteurs étant défavorables à la fixation par le sol du bore ou du manganèse apportés, la plante en absorberait des plus grandes quantités, ce qui expliquerait les symptômes de toxicité plus accentués apparus dans ce cas.

Bien que l'absence de bore et de manganèse sur un sol recevant tous les autres éléments nutritifs n'ait pas provoqué de symptôme visible , les plantes dans ce cas se développent moins bien et sont moins longues que celles qui ont reçu une fumure complète ce qui est en accord avec les résultats de :
ABo (1980) qui a trouvé que les jeunes plantes de blé n'ayant pas reçu de manganèse se développent moins bien sans manifester pour autant des symptômes de déficience et de ceux de FISCHER et BUSSLER (1984) qui ont constaté que le manque du bore diminue le développement des tiges et des racines; il limite aussi le développement des entre-noeuds.

Nous avons remarqué que l'effet toxique apparait, en général, sur les vieilles feuilles en premier lieu ce qui est logique puisque la balance et la coordination des réactions de métabolisme sont perturbées

longtemps avant l'apparition des symptômes visibles (BUSSLER, 1974). Par ailleurs, pour la même dose de bore ou de manganèse nous avons trouvé que l'effet toxique du manganèse est moins aigu ; cela pourrait être dû, selon les travaux d'autres auteurs (BUSSLER, 1981), au changement de l'activité physiologique de ce métal par suite de changement de valence (Mn 2^{+} est oxydé en Mn $^{4+}$ et déposé dans des cellules ou des sites au métabolisme moins actif.

Nous avons observé que la toxicité provoquée par des fortes doses de bore (8 et 10,5ppm) a pour conséquence un retard du développement des feuilles, une réduction du nombre d'épillets totaux et une augmentation des épillets stériles ainsi que des symptômes de nécroses, GRANDALL, et al.,(1981) ont observé que la toxicité de bore sur les poiriers se manifeste par des signes semblables : retard de développement des feuilles, réduction du nombre des fleurs et aucune de ces fleurs ne donne de fruit.La toxicité du bore qui commence à se manifester par la brûlure de l'extrémité des feuilles du blé, par des nécroses marginales et qui finissent par se généraliser sur l'ensemble des feuilles,pouvait s'expliquer par une accumulation progressive de cet élément dans ces organes conduisant à la décomposition des tissus. MAYNARD (1979) en décrivant les symptômes de toxicité du bore signale que ceux-ci commencent par une nécrose des bords et de l'extrémité des feuilles qui se termine par la brûlure et la mort des feuilles de la plupart des végétaux. GUPTA et MACLEOD(1981)a observé que la toxicité du bore dans un sol limoneux sableux à pH 5,5 se traduit sur le blé par une coloration brun claire (sur extrémités des feuilles âgées) qui évolue plus tard en taches vertes bleuâtres claires.

L'apparition des taches nécrosées sur les limbes de blé même avant la fin de leur croissance ainsi que la chlorose des jeunes feuilles et la brûlure des extrémités des feuilles sont des symptômes assez caractéristiques de la toxicité en manganèse sur les céréales; ils ont été signalés par FOY (1983) sur l'orge. De même le retard de la croissance des plantes et des feuilles que nous avons montré pour le blé est un aspect caractéristique de désordre physiologique provoqué par la toxicité en manganèse sur plusieurs cultures (LINK,1975, 1979: SMILEY, 1976...) MORAGHAN et al. (1980) travaillant sur le soja ont observé que l'enroulement des feuilles, constaté dans notre travail, est un symptôme de toxicité en mangénèse.

Nous savons que l'excès du bore ou du manganèse peut induire une déficience d'un élément antagoniste et par conséquence les symptômes visibles pourraient être dus à cette déficience et non à l'excès de l'élément apporté. HORST (1976) a en effet trouvé que l'excès en manganèse induit une déficience en fer qui coïncide avec les taches apparues sur les feuilles et provoquées par une forte fumure en manganèse. Nous devons donc procéder à des analyses de plantes et de sol pour déceler ces probabilités et ne pas nous fier uniquement aux symptômes visibles. En outre, les symptômes ne sont pas suffisamment spécifiques et prêtent à confusion et nous ne pouvons guère ainsi être affirmatifs à partir uniquement de ces symptômes; ce ne sont pour nous que des indicateurs visibles appelant des analyses chimiques afin de déceler les causes exactes de ces déformations extérieures.

Une baisse plus importante de chlorophylle a été détectée sur les plantes cultivées sur sol brun lessivé, cette baisse se traduit par des symptômes de décoloration également plus accentuée sur ce sol. Elle pourrait provenir de la mort des tissus verts de ces plantes suite à une accumulation des oligoéléments qu'il est nécessaire de vérifier par l'analyse chimique.

D'autre part, nous pensons que la diminution de chlorophylle dans les limbes influence, par la baisse de la photosynthèse et la perturbation probable de la distribution des auxines et des cytoquinines (MICHAEL et al.,1969), la durée de remplissage et de la maturation des grains.

HOLMES (1973) a signalé que le taux de chlorophylle joue un rôle sur le taux d'humidité des grains du blé et influence le temps de maturation de ceux-ci ainsi que le changement de couleur (jaunissement des épis et senescence d'inflorescence).

VI - 5 - CONCLUSION

Le bore et le manganèse affèctent la croissance et le développement du blé : le manque et l'excès en bore et en manganèse diminuent sensiblement la longueur finale des limbes, ce manque ne réduit pas systématiquement le nombre total de feuilles et celui-ci dépend de la fertilité spécifique naturelle des sols. D'autre part, alors que le manque de bore et de manganèse se traduit par une floraison et une épiaison plus précoces, la toxicité entraîne un retard. Nous signalons que la toxicité du bore affecte plus que celle du manganèse la croissance et le développement du blé, cela viendrait de son rôle multiple et plus indispensable à l'accomplissement du métabolisme de la plante. D'ailleurs la fertilisation en forte quantité de bore provoque systématiquement une réduction du nombre total de feuilles.

Ainsi nous avons dégagé un effet évident du sol sur la gravité des dommages visuels causés par la toxicité en bore ou en manganèse.

Le degré de toxicité influence la diminution de chlorophylles ce qui peut être en relation avec la diminution de la production et de la qualité des grains en particulier. Cette baisse est semblable en cas de toxicité en bore ou en manganèse, nous essayerons de préciser cette relation dans le chapitre concernant la production de la matière sèche.

Bien que les symptômes visuels de stress oligominéral signalés dans ce travail, sont la conséquence d'abérrations histologiques et de changement de la composition chimique de la plante, ils ne sont pas toujours identifiables. Ils peuvent aussi résulter de l'intéraction complexe entre différents ions; par conséquent "le syndrome de problème du sol" ne peut pas être décelé avec sûreté par des symptômes.

CHAPITRE VII

FERTILISATION EN BORE ET MANGANESE ET RENDEMENT

CHAPITRE VII

FERTILISATION EN BORE ET MANGANSE ET RENDEMENT

VII - 1 - FERTILITE NATURELLE SPECIFIQUE (FNS) DES SOLS ET RENDEMENT.

Nous appelons fertilité naturelle des sols la capacité des sols, en cas d 'absence de tout apport de fumure, à fournir des éléments nutritifs aux plantes. Cette capacité est spécifique de chaque sol et reflétée par la production de biomasse que nous allons étudier.

Nous donnerons ensuite les résultats de l'effet de la fertilisation en oligoéléments (bore et manganèse) sur cette production et enfin nous essayerons d'interpréter ces résultats et de faire une comparaison entre la fertilité des trois sols étudiés.

Avant de comparer, au moyen de test t , le rendement des différents organes, nous avons calculé (tableau 41) la moyenne, l'écart-type et le coéfficient de variation de ces rendements, ces calculs dégagent des écarts-types et des coéfficients de variation très satisfaisants entre les répétitions.

A partir des moyennes du tableau 41 nous avons dressé les histogrammes de la fig. 57 pour le rendement des différents organes de blé cultivé sur les trois sols en cas de fertilité naturelle spécifique des sols (F.N.S.) et en cas de fertilisation complète (F.C.), c'est-à-dire l'apport de tous les éléments nutritifs (chap. III), en taux usuel.

Nous avons comparé (dans le tableau 42) les moyennes de rendements des sols, en calculant le t de la loi de student avec $n_I + n_2 - 2$ degrés de liberté et au niveau de probabilité 0,975.

Ce tableau et la figure 57 montrent que le sol de rendzine donne les meilleurs rendements (surtout en grains) et le sol sur allu-

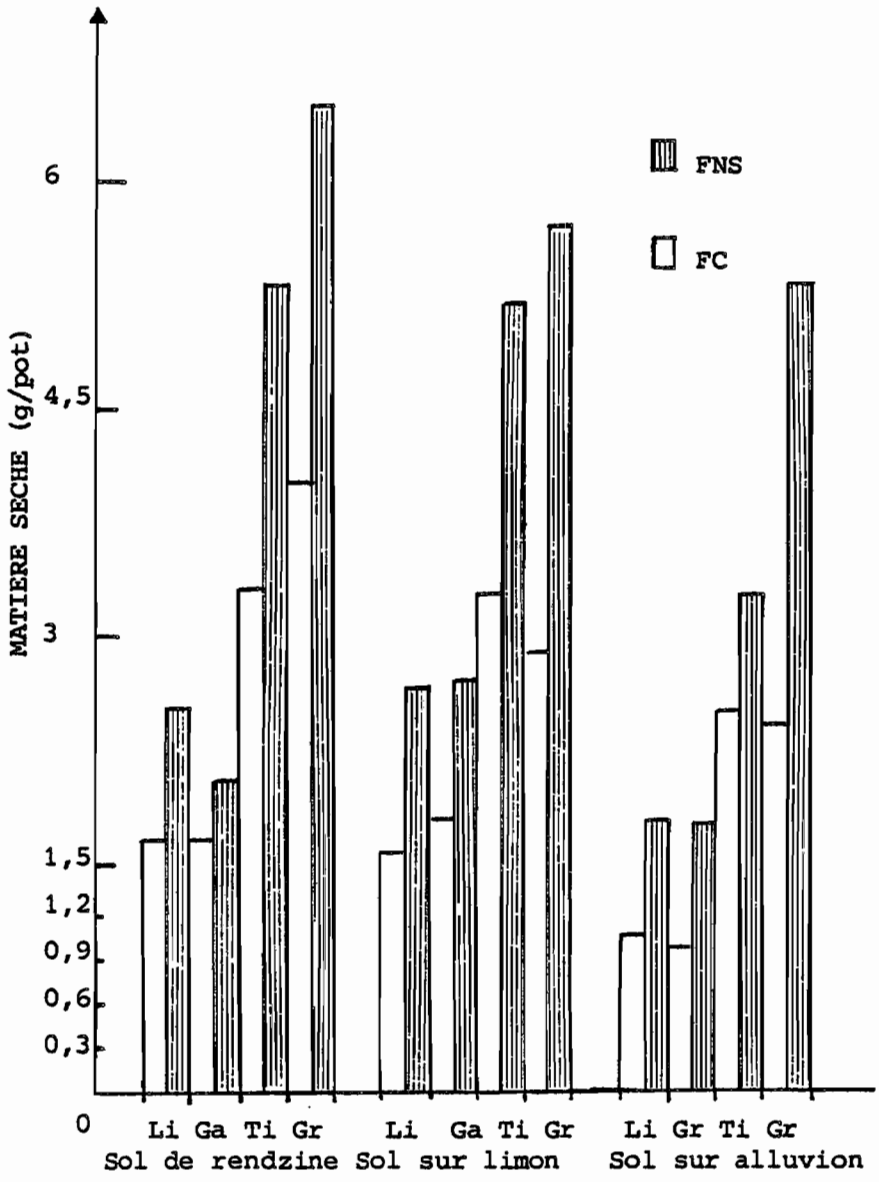


Figure 58 Production moyenne des différents organes de blé cultivé sur trois sols en cas de fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) et en cas de fertilisation complète (F.C.)

Légende : Li = Limbes. Ba = Gaines. Ti = Tiges.. Gr. = grains.

Tableau 41 - Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des rendements des différents organes de blé cultivés sur différents sols en cas de fertilité spécifique naturelle spécifique (F.N.S. modalité 00) et en cas de fertilisation complète (F.C. modalité 0,51).

Substrat : Blé cultivé sur sol brun lessivé (b) gMS/Pot

Blé cultivé sur sol rendzine sur calcaire lutétien (r)

Modalité		Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1*	00**	r/Gr	3	3.8228	.1214	3.1748%
1	00	r/Li	3	1.5886	.0541	3.4045%
1	00	r/Ga	3	1.5973	.0784	4.9093%
1	00	r/Ti	3	3.1792	.0429	1.3480%
1	00	b/Gr	3	2.8043	.1048	3.7361%
1	00	b/Li	3	1.5787	.0306	1.9352%
1	00	b/Ga	3	1.7369	.0303	1.7432%
1	00	b/Ti	3	3.1660	.0649	2.0485%
2	.51	r/Gr	3	6.2851	.1715	2.7281%
2	.51	r/Li	3	2.4504	.0992	4.0474%
2	.51	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
2	.51	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
2	.51	r/Ti	3	4.6281	.1494	3.2287%
2	.51	b/Gr	3	4.9791	.1083	2.1748%
2	.51	b/Li	3	2.5933	.0848	3.2695%
2	.51	b/Ga	3	2.6300	.1107	4.2078%
2	.51	b/Ti	3	4.4976	.1695	3.7697%

substrat : blé cultivé sur sol peu évolué sur alluvion.

Fichier SYRIE1

Modalité		Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1*	A00**	Li(g)	3	1.048	.080	7.674%
1	A00	Gr(g)	3	2.339	.125	5.327%
1	A00	GA(g)	3	.910	.057	6.244%
1	A00	Ti(g)	3	2.482	.084	3.371%
2	A.51	Li(g)	3	1.738	.083	4.782%
2	A.51	Gr(g)	3	4.649	.167	3.586%
2	A.51	GA(g)	3	1.715	.093	5.394%
2	A.51	Ti(g)	3	3.158	.124	3.929%

Légende : r/Gr rendement des grains (g/pot) du sol de rendzine (r).
r/Li " des limbes " " "
r/G2 " des gaines " " " " "
r/Ti " des tiges " " " " "
b/Gr " des grains " " sur limon (b).

Les moyennes sont exprimées en gramme de matière sèche pot (gMs/pot).

* Les chiffres de cette colonne représentent les numéros des traitements.
** Le premier chiffre donne la dose de bore apportée ($\mu g.g^{-1}$) et le deuxième donne la dose de manganèse apporté ($\mu g.g^{-1}$)

vion donne les plus mauvais rendements, en accord avec la teneur en matière organique et azote, la capacité d'échange cationique (C.E.C.) et les autres caractéristiques de sols (chapitre II). La différence de la fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) entre les sols de rendzine et celui sur limon apparait significative pour le rendement en grains et en matière sèche totale (tableau 42), elle l'est également entre le sol sur limon et le sol sur alluvion.

Nous constatons ainsi que la fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) reflétée par la production de biomasse est la plus importante pour le sol de rendzine, elle est moins importante pour le sol de limon et faible pour le sol sur alluvion. Il en résulte que malgré la différence de FNS

Tableau 42 - Test t pour les rendements de la fertilité naturelle (F.N.S).

Sol	Limbes	Gaines	Tiges	Grain	M.S Totale
S.R/S.A	9,66*	14,05*	12,02*	14,76*	33,57*
S.R/S.L	0,28	2,92	- 0,85	10,63*	8,81*
S.L/S.A	10,70*	22,28*	11,21*	6,44*	29,01*

Légende.

S.R. - Sol rendzine sur calcaire.

S.A. - sol peu évolué sur alluvion.

S.L. - Sol brun lessivé sur limon.

M.S. Matière sèche total

* t = significatif au niveau de probalité 0,975

t théorique = 2,776 au niveau de probalité 0,975 avec

$n_1 + n_2 - 2 = 4.$

entre les sols de région humide (sol de rendzine et sol sur limon), le sol de région aride (sol sur alluvion) montre la pauvreté importante par rapport aux sols de région humide.

Pour avoir une idée plus approfondie sur la fertilité de nos sols, nous avons étudié la réponse de chaque sol à une fertilisation complète (F.C.) en comparant la F.N.S. à la F.C. Le tableau 41 donne les rendements dans les deux cas qui sont tracés par la figure 58 et une étude de comparaison de variance entre ces rendements, dans les deux cas faite au moyen de test t, est consignée dans le tableau 43.

Ce tableau montre que tous les sols répondent significativement à la fertilisation. La différence entre les répétitions n'étant pas significative (tableau 41) valorise davantage l'intérêt que l'on peut prêter au test t. Les t obtenus sont tous significatifs au seuil de probabilité 0,975. Ils sont plus importants pour les grains que pour la paille. limbes, gaines et tiges).

Tableau 43 - Test T pour les rendements des trois sols en cas de fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) et en cas de fertilisation complète (F.C.).

Sol	Traitement	Limbes	Gaines	Tiges	Grains
S.R.	F.C./F.N.S.	13,20*	6,31*	16,13*	20,30*
S.L.	F.C./F.N.S.	19,59*	13,49*	12,71*	29,08*
S.A.	F.C./F.N.S.	10,34*	12,85*	7,82*	19,22*

* t : significatif au niveau de probabilité 0,975.

Nous remarquons de façon analogue que c'est le sol sur limon qui manifeste la réponse la plus significative à la fertilisation par rapport à sa F.N.S., par contre le sol sur alluvion répond le moins bien à la fertilisation , le sol de rendzine se situe, en général,plus proche du sol sur limon. Cela confirme le résultat précédent sur la pauvreté du sol sur alluvion et met en cause ses caractéristiques, surtout physiques, mauvaises qui réduisent donc la réponse de ce sol à la fertilisation; ainsi sa fertilité potentielle s'améliore peu par rapport à celles des deux autres sols.

Nous avons trouvé également un indice de récolte * (BAKER, 1982; JOHANSON et KANEMASU, 1982) plus important en cas de fertilisation complète qu'en cas de fertilité naturelle spécifique (tableau 44), cet indice est plus faible pour le sol sur limon.

Tableau 44 : Indice de récolte en cas de fertilisation complète (F.C.)

	Indice de récolte %		
	Sol de rendzine	Sol sur limon	Sol sur alluvion
F.N.S.	37,5	30,2	34,5
F.C.	41,0	33,9	41,3

* indice de récolte = $\frac{\text{rendement des grains}}{\text{rendement total (grains + paille)}} \times 100$

(rendement en matière sèche)

VII-2 - PRODUCTION DE BIOMASSE ET FERTILISATION EN OLIGO-ELEMENTS.

2.1 - Etude statistique informatisée.

Il est utile de rappeler très brièvement la démarche que nous avons créée et utilisée dans les traitements des données obtenues dans nos recherches. Ce rappel permettra au lecteur de mieux suivre la logique de la succession des traitements de nos données tout au long des chapitres à venir. Les traitements sont réalisés par un logiciel modulaire SPCLAS (PANSU, 1983) sur un ordinateur HP 9845 modifié selon nos besoins; ce logiciel est constitué de plusieurs modules correspondant à chacune des étapes suivantes :

2.1.1 - Création des "fichiers sources".

Afin de permettre les traitements des données, il est logique de commencer par introduire nos données brutes en leur attribuant des références spécifiques de façon à ne pas mélanger les données des différentes répétitions, des différents traitements, des différents organes et des différents sols. Une fois les données introduites, vérifiées et corrigées, elles sont stockées sur disquette et listées sur papier.
Nous avons ainsi nos "fichiers sources" prêts pour la suite. Lorsque l'on sait qu'il y a neuf éléments qui sont dosés sur cinq organes de la plante pour chacune de quatre répétitions de 18 traitements pour chaque sol; auxquels s'ajoute la matière sèche de chacun des organes pour toutes ces répétitions et traitements, on se rend compte de l'importance du nombre des données.

2.2.2 - Création des sous-fichiers.

Parallèlement à certaines études sur ces "fichiers sources", ces fichiers sont divisés en "sous fichiers" qui permettent des traitements statistiques particuliers; par exemple, lorsqu'on veut étudier l'effet des différentes doses de bore et de manganèse sur la production des grains il est indispensable de séparer les données concernant les grains en "sous-fichiers" à partir de "fichiers sources".

Ces sous-fichiers stockés sur disquette permettent d'effectuer en série des études de comparaison. "Les sous-fichiers" sont créés en fonction de la fertilisation en bore et en manganèse avec l'un ou l'autre de ces fertilisants comme premier ou second facteur contrôlé selon l'étude désirée.

2.2.3 - Traitements statistiques.

2.2.3.1 - Fichiers des moyennes.

Le module "fichiers moyennes" appliqué avec "fichiers sources" nous donnent les moyennes, les écarts types et les coefficients de variation des répétitions. C'est une première approche nécessaire qui permet de rendre compte de la validité des résultats.

2.2.3.2 - Analyse de variance.

Selon que nos expériences ont été menées en plans factoriels ou pyramidal, nous avons procédé à des analyses de variance appropriées sur les "sous-fichiers". Le test F(fonction discriminante de test de SNEDECOR représentant un rapport entre les carrés moyens de l'effet des facteurs C.E.A., 1978), permet d'affirmer ou d'infirmer la signification de l'influence des facteurs contrôlés(B et Mn) et résiduels pour chaque organe des plantes sur les teneurs des éléments et sur la production de matière sèche.

2.2.3.3 - Tests d'égalité de variance.

Pour s'assurer de la validité des analyses de variance nous avons appliqué plusieurs tests d'égalité de variance (test de BARTLETT, test Gde COCHRAN, test R de HARTLEY et des tests des étendues (C.E.A., 1978)) entre les répétitions. Un test préalable de chi_2 avait montré la normalité de la distribution des répétitions.

2.2.3.4 - Etude du coefficient de corrélation.

Nous avons calculé les coefficients de corrélation entre des paires de données pour le même sol ou entre deux sols sur les "fichiers sources".

2.2.3.5 -Analyse de régression.

Pour étudier la relation entre deux variables (matière sèche_fertilisant, Teneur - fertilisant, Teneur - matière sèche), nous avons tracé les courbes de régression en choisissant l'équation de régression appropriée.

Enfin sur le nombre très important des tableaux et des représentations graphiques, nous serons obligés de le limiter d'une façon importante pour rester dans des limites acceptables.

2.2 Biomasse et fertilisation en bore.

Nous donnons d'abord les résultats sous forme de fichier des moyennes dans les tableaux 45, 46 et 47. Ils montrent que les écarts types et les coefficients de variation (C.V.) sont très acceptables (très rarement les C.V. dépassent le 5 %), ce qui situe déjà la confiance qu'on peut prêter aux différentes études statistiques ultérieures.

Nous constatons selon l'ensemble de nos expériences (tableaux 45 et 46) que le seuil optimal de fertilisation en bore est 0,5 µg/g du sol pour les trois sols étudiés (modalité 2 des tableaux 45 et 46), mais une dose de 3ppm de bore ne baisse pas significativement la production de la matière sèche de n'importe quel organe, ce qui correspond à l'absence de symptôme visible que nous avons observée dans le chapitre VI. Nous avons utilisé le test t pour étudier l'effet de chaque dose sur le rendement des organes de blé. Le tableau 47 donne l'ensemble des résultats du test t pour le rendement en grains. Nous constatons que, bien que la dose 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore réduise le rendement en grains du sol de rendzine de 11 % et du sol sur limon de 22 % (calcul fait sur les moyennes), le test t ne décèle pas d'influence significative ni pour le blé cultivé sur sol de rendzine, ni pour celui cultivé sur sol sur limon, mais une fertilisation avec 5,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore baisse la production des grains de 36,8 % et de 51,98 % respectivement pour ces deux sols. Il est important de remarquer l'accroissement de la signification du test t en fonction de la fertilisation apportée.

TABLEAU 45 - Moyenne, écart-type et coefficient de variation (C.V.%) des rendements (g de matière sèche/pot) du sol de rendzine (r) et du sol sur limon (b) en fonction de fertilisation en bore et en manganèse.

"Première expérience"

Modalité	Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1*	r/Gr	4	2.5036	.0727	2.9027%
1	r/Li	4	1.1128	.0619	5.5641%
1	r/Ga	4	1.0656	.0522	4.8947%
1	r/Ti	4	2.7163	.0403	1.4827%
1	b/Gr	4	1.8809	.0496	2.6354%
1	b/Li	4	.9503	.0295	3.1061%
1	b/Ga	4	.8670	.0211	2.4294%
1	b/Ti	4	1.7854	.0638	3.5715%
2	r/Gr	4	3.7160	.0802	2.1585%
2	r/Li	4	1.7375	.0369	2.1223%
2	r/Ga	4	1.4436	.0302	2.0902%
2	r/Ti	4	3.7285	.1281	3.4355%
2	b/Gr	4	2.9776	.0753	2.5305%
2	b/Li	4	1.3935	.0335	2.4023%
2	b/Ga	4	1.4020	.0306	2.1829%
2	b/Ti	4	2.5853	.1020	3.9453%
3	r/Gr	4	3.2669	.0528	1.6163%
3	r/Li	4	1.5545	.0319	2.0518%
3	r/Ga	4	1.2930	.0378	2.9199%
3	r/Ti	4	3.1901	.0978	3.0643%
3	b/Gr	4	2.3631	.0470	1.9884%
3	b/Li	4	1.0544	.0394	3.7399%
3	b/Ga	4	1.3116	.0400	3.0475%
3	b/Ti	4	2.3089	.0668	2.8921%
4	r/Gr	4	3.3522	.0816	2.4334%
4	r/Li	4	1.6019	.0415	2.5913%
4	r/Ga	4	1.2970	.0291	2.2473%
4	r/Ti	4	2.8289	.0954	3.3737%
4	b/Gr	4	2.3994	.0937	3.9055%
4	b/Li	4	1.0500	.0354	3.3707%
4	b/Ga	4	1.3183	.0371	2.8170%
4	b/Ti	4	2.1451	.0491	2.2907%
5	r/Gr	4	3.2949	.0378	1.1462%
5	r/Li	4	1.4942	.0350	2.3418%
5	r/Ga	4	1.3944	.0198	1.4171%
5	r/Ti	4	2.7256	.0541	1.9865%
5	b/Gr	4	2.3083	.0554	2.3985%
5	b/Li	4	1.0345	.0447	4.3213%
5	b/Ga	4	1.2744	.0332	2.6030%
5	b/Ti	4	2.2779	.0467	2.0505%
6	r/Gr	4	3.4677	.0914	2.6355%
6	r/Li	4	1.5934	.0374	2.3474%
6	r/Ga	4	1.2506	.0265	2.1168%
6	r/Ti	4	2.9500	.0818	2.7712%
6	b/Gr	4	2.2687	.0391	1.7243%
6	b/Li	4	1.0885	.0407	3.7405%
6	b/Ga	4	1.3912	.0331	2.3826%
6	b/Ti	4	2.0957	.0310	1.4784%
7	r/Gr	4	2.3469	.0479	2.0417%
7	r/Li	4	1.2598	.0512	4.0646%
7	r/Ga	4	1.1476	.0294	2.5595%
7	r/Ti	4	2.2881	.0308	1.3463%
7	b/Gr	4	1.4297	.0467	3.2677%
7	b/Li	4	.9209	.0413	4.4804%
7	b/Ga	4	1.0319	.0381	3.6935%
7	b/Ti	4	1.9221	.0228	1.1872%

... Suite du TABLEAU 45.

8	r/Gr	4	2.5215	.0705	2.7975%
8	r/Li	4	1.5102	.0383	2.5383%
8	r/Ga	4	1.2100	.0652	5.3901%
8	r/Ti	4	2.1973	.0370	1.6853%
8	b/Gr	4	1.6597	.0477	2.8760%
8	b/Li	4	.9616	.0250	2.6028%
8	b/Ga	4	.9796	.0248	2.5366%
8	b/Ti	4	2.0786	.0364	1.7519%
9	r/Gr	4	2.4095	.0338	1.4035%
9	r/Li	4	1.5140	.0328	2.1634%
9	r/Ga	4	1.2615	.0222	1.7573%
9	r/Ti	4	2.3898	.0329	1.3751%
9	b/Gr	4	1.4780	.0403	2.7297%
9	b/Li	4	1.0641	.0523	4.9110%
9	b/Ga	4	1.1980	.0173	1.4447%
9	b/Ti	4	1.9654	.0502	2.5547%
10	r/Gr	4	2.2259	.0369	1.6581%
10	r/Li	4	1.4634	.0241	1.6462%
10	r/Ga	4	1.3039	.0414	3.1788%
10	r/Ti	4	2.5797	.0370	1.4360%
10	b/Gr	4	1.8133	.0519	2.8596%
10	b/Li	4	1.0226	.0392	3.8336%
10	b/Ga	4	1.2259	.0423	3.4533%
10	b/Ti	4	1.9849	.0890	4.4848%
11	r/Gr	4	1.3021	.0529	4.0656%
11	r/Li	4	.6865	.0158	2.2961%
11	r/Ga	4	.7227	.0236	3.2591%
11	r/Ti	4	1.7306	.0339	1.9591%
11	b/Gr	4	.7468	.0322	4.3101%
11	b/Li	4	.6480	.0174	2.6866%
11	b/Ga	4	.6723	.0215	3.1946%
11	b/Ti	4	1.1343	.0311	2.7393%
12	r/Gr	4	1.6130	.0435	2.6984%
12	r/Li	4	.7617	.0193	2.5285%
12	r/Ga	4	.7802	.0194	2.4842%
12	r/Ti	4	1.8532	.0368	1.9880%
12	b/Gr	4	.9083	.0267	2.9438%
12	b/Li	4	.6872	.0154	2.2394%
12	b/Ga	4	.6535	.0195	2.9797%
12	b/Ti	4	1.2834	.0217	1.6946%
13	r/Gr	4	1.7245	.0571	3.3094%
13	r/Li	4	1.1986	.0298	2.4876%
13	r/Ga	4	1.0511	.0340	3.2328%
13	r/Ti	4	2.1645	.0287	1.3238%
13	b/Gr	4	1.6552	.0569	3.4378%
13	b/Li	4	.9603	.0390	4.0638%
13	b/Ga	4	.9559	.0198	2.0698%
13	b/Ti	4	1.9007	.0427	2.2484%
14	r/Gr	4	1.3177	.0318	2.4153%
14	r/Li	4	.8691	.0217	2.4957%
14	r/Ga	4	.8373	.0284	3.3970%
14	r/Ti	4	1.6628	.0439	2.6408%
14	b/Gr	4	1.7645	.0423	2.3997%
14	b/Li	4	.7513	.0297	3.9564%
14	b/Ga	4	.9401	.0197	2.0950%
14	b/Ti	4	1.6832	.0336	1.9990%
15	r/Gr	4	1.9608	.1253	6.3920%
15	r/Li	4	.9788	.0254	2.5908%
15	r/Ga	4	.8858	.0151	1.7083%
15	r/Ti	4	1.8235	.0408	2.2393%
15	b/Gr	4	1.4007	.0204	1.4557%
15	b/Li	4	.8742	.0186	2.1254%
15	b/Ga	4	.8881	.0212	2.3908%
15	b/Ti	4	1.4031	.0229	1.6343%

16	r/Gr	4	1.3042	.0583	4.4698%
16	r/Li	4	.7521	.0175	2.3271%
16	r/Ga	4	.7235	.0163	2.2572%
16	r/Ti	4	1.6246	.0407	2.5077%
16	b/Gr	4	1.1036	.0266	2.4144%
16	b/Li	4	.6458	.0178	2.7530%
16	b/Ga	4	.8513	.0167	1.9596%
16	b/Ti	4	1.4725	.0206	1.3970%
17	r/Gr	4	1.2478	.0494	3.9591%
17	r/Li	4	.7496	.0146	1.9474%
17	r/Ga	4	.7165	.0226	3.1508%
17	r/Ti	4	1.4782	.0274	1.8545%
17	b/Gr	4	.9951	.0256	2.5773%
17	b/Li	4	.5722	.0180	3.1427%
17	b/Ga	4	.8272	.0410	4.9604%
17	b/Ti	4	.9443	.0274	2.9030%
18	r/Gr	4	1.6038	.0394	2.4571%
18	r/Li	4	.8343	.0251	3.0097%
18	r/Ga	4	.9300	.0290	3.1184%
18	r/Ti	4	1.7287	.0554	3.2054%
18	b/Gr	4	1.5377	.0504	3.2794%
18	b/Li	4	.9376	.0240	2.5550%
18	b/Ga	4	.8837	.0163	1.8443%
18	b/Ti	4	1.3462	.0250	1.8579%

LEGENDE :

Modalité : Traitements
Colonne : le sol sur lequel le blé est cultivé et l'organe
r : sol de rendzine
b : sol sur limon
Gr : grains
Li : limbes
Ga : gaines
Ti : tiges
n/Gr : les grains de blé sur sol de rendzine
Moyenne : la moyenne de quatre répétitions est donnée en g/pot.

* Les chiffres des modalités représentent les traitements du plan factorial qui sont : 1 - B lanc. 2 - Fertilisation complète (F.C). 3 - Fertilisation complète sauf le bore et le manganèse (F.C.- B et Mn). 4 - F.C. + 3ppm de B et 6ppm de Mn. 5 - F.C. + 3ppm de B. 6 - F.C. + 6ppm de Mn. 7 - F.C. + 5,5 ppm de B. 8 - F.C. + 11ppm de Mn. 9 - F.C. + 5,5ppm de B et 6ppm de Mn. 10 - F.C. + 3ppm de B et 11ppm de Mn. 11 - F.C. + 8ppm de B. 12 - F.C.+ 16ppm de Mn - 13 - F.C. + 5,5ppm de B et 11ppm de Mn. 14 - F.C. + 5,5ppm de B et 16ppm de Mn. 15 - F.C. + 8ppm de B. 16 - F.C. + 8ppm de B et 11ppm de Mn - 17 - Fc. + 8ppm de B et 16ppm de Mn. 18 - F.C. + 3ppm de B et 16ppm de Mn.

TABLEAU 46 - Moyenne, écart-type et coefficient de variation (C.V.%) des rendements (g de matière sèche / pot) des différents organes du blé cultivé sur sol de rendzine (r), sol sur limon (b) et sol sur alluvion (A) en fonction de fertilisation en bore et en manganèse.

"Deuxième expérience"

----------Fichier AB02----------

Modalite	Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1 * 00 **	r/Gr	3	3.8228	.1214	3.1748%
1 00	r/Li	3	1.5886	.0541	3.4045%
1 00	r/Ga	3	1.5973	.0784	4.9093%
1 00	r/Ga	3	1.5973	.0784	4.9093%
1 00	r/Ti	3	3.1792	.0429	1.3480%
1 00	b/Gr	3	2.8043	.1048	3.7361%
1 00	b/Li	3	1.5787	.0306	1.9352%
1 00	b/Ga	3	1.7369	.0303	1.7432%
1 00	b/Ti	3	3.1660	.0649	2.0485%
2 .51	r/Gr	3	6.2851	.1715	2.7281%
2 .51	r/Li	3	2.4504	.0992	4.0474%
2 .51	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
2 .51	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
2 .51	r/Ti	3	4.6281	.1494	3.2287%
2 .51	b/Gr	3	4.9791	.1083	2.1748%
2 .51	b/Li	3	2.5933	.0848	3.2695%
2 .51	b/Ga	3	2.6300	.1107	4.2078%
2 .51	b/Ti	3	4.4976	.1695	3.7697%
3 31	r/Gr	3	5.5478	.1302	2.3473%
3 31	r/Li	3	2.1670	.0472	2.1774%
3 31	r/Ga	3	1.7830	.0336	1.8856%
3 31	r/Ga	3	1.7830	.0336	1.8856%
3 31	r/Ti	3	3.4133	.0652	1.9089%
3 31	b/Gr	3	3.8840	.0404	1.0392%
3 31	b/Li	3	2.2053	.0380	1.7239%
3 31	b/Ga	3	2.4167	.0509	2.1076%
3 31	b/Ti	3	4.0592	.0697	1.7168%
4 .56	r/Gr	3	6.1507	.1783	2.8989%
4 .56	r/Li	3	2.2058	.0705	3.1939%
4 .56	r/Ga	3	1.7867	.0306	1.7099%
4 .56	r/Ga	3	1.7867	.0306	1.7099%
4 .56	r/Ti	3	3.7667	.1110	2.9474%
4 .56	b/Gr	3	3.8767	.0737	1.9012%
4 .56	b/Li	3	2.0693	.0640	3.0948%
4 .56	b/Ga	3	2.5457	.0460	1.8088%
4 .56	b/Ti	3	3.5280	.1141	3.2328%
5 816	r/Gr	3	2.3200	.0462	1.9918%
5 816	r/Li	3	1.0438	.0288	2.7550%
5 816	r/Ga	3	1.8185	.0426	2.3434%
5 816	r/Ga	3	1.8185	.0426	2.3434%
5 816	r/Ti	3	1.7806	.0382	2.1432%
5 816	b/Gr	3	1.6743	.0628	3.7496%
5 816	b/Li	3	1.0667	.0253	2.3742%
5 816	b/Ga	3	1.3353	.0842	6.3054%
5 816	b/Ti	3	1.7933	.0888	4.9491%

... suite du TABLEAU 46.

6	81	r/Gr	3	1.7202	.0350	2.0350%
6	81	r/Li	3	1.0352	.0456	4.4089%
6	81	r/Ga	3	.9550	.0219	2.2906%
6	81	r/Ga	3	.9550	.0219	2.2906%
6	81	r/Ti	3	1.9879	.0451	2.2695%
6	81	b/Gr	3	1.3125	.0663	5.0471%
6	81	b/Li	3	1.1467	.1282	11.1769%
6	81	b/Ga	3	1.2480	.0461	3.6963%
6	81	b/Ti	3	1.9997	.1596	7.9811%
7	.516	r/Gr	3	2.5574	.1204	4.7068%
7	.516	r/Li	3	.9402	.0290	3.0858%
7	.516	r/Ga	3	1.0204	.0274	2.6855%
7	.516	r/Ga	3	1.0204	.0274	2.6855%
7	.516	r/Ti	3	2.2290	.1208	5.4188%
7	.516	b/Gr	3	1.4913	.0918	6.1560%
7	.516	b/Li	3	1.3347	.0660	4.9458%
7	.516	b/Ga	3	1.5056	.0796	5.2845%
7	.516	b/Ti	3	2.3595	.0613	2.5991%

sol peu évolué sur alluvion

----------Fichier SYRIE1----------

Modalité	Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1 * A00 **	Li(g)	3	1.048	.080	7.674%
1 A00	Gr(g)	3	2.339	.125	5.327%
1 A00	GA(g)	3	.910	.057	6.244%
1 A00	Ti(g)	3	2.482	.084	3.371%
2 A.51	Li(g)	3	1.738	.083	4.782%
2 A.51	Gr(g)	3	4.649	.167	3.586%
2 A.51	GA(g)	3	1.715	.093	5.394%
2 A.51	Ti(g)	3	3.158	.124	3.929%
3 A81	Li(g)	3	1.067	.043	4.043%
3 A81	Gr(g)	3	2.166	.039	1.811%
3 A81	GA(g)	3	.964	.035	3.583%
3 A81	Ti(g)	3	1.869	.080	4.266%
4 A.516	Li(g)	3	1.343	.047	3.470%
4 A.516	Gr(g)	3	2.387	.043	1.812%
4 A.516	GA(g)	3	1.230	.034	2.768%
4 A.516	Ti(g)	3	2.001	.091	4.526%
5 A816	Li(g)	3	1.263	.064	5.095%
5 A816	Gr(g)	3	2.439	.078	3.190%
5 A816	GA(g)	3	.992	.045	4.487%
5 A816	Ti(g)	3	1.970	.154	7.793%

* Les chiffres dans cette colonne représentent les numéros des traitements.

** Le premier chiffre donne la dose de bore apportée ($\mu g.g^{-1}$) et la deuxième donne la dose de manganèse apporté ($\mu g.\ g^{-1}$).

TABLEAU 47 - Tests t pour les rendements en fonction de la fertilisation en B et en Mn séparés ou combinés.

Traitement		Tem/3-1	Tem/5,5-1	Tem/8-1	Tem/0,5-6	Tem/0,5-11	Tem/0,5-16	Tem/3-6	Tem/8-11	Tem/8-6	Tem/3-11	Tem/5,5-11	Tem/3-16	Tem/5,5-16	Tem/8-16
GRAINS	S.R	1,16	26,38*	52,75*	3,68*	16,90*	48,5*	1,45*	8,41*	18,93*	31,66*	39,87*	50,68*	42,96*	54,66*
	S.L	1,58	28,57*	55,55*	2,79*	20,37*	52,95*	0,74	46,17*	36,58*	16,71*	19,04*	23,71*	18,76*	50,72*

LEGENDE : Tem/3-1 = Tem/ Fertilisation avec 3ppm de B et 1ppm de Mn dont le premier chiffre représente la fertilisation en bore et le deuxième celle en manganèse.

S.R. Sol de rendzine

S.L. sol sur limon.

* t significatif (Les valeurs de t sont significatives au niveau de probabilité 0,975 lorsqu'ils sont plus grands que le t théorique = 2,447).

Le test t montre qu'entre la dose 0,5 et 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore l'accroissement de t n'est pas significatif et qu'au delà de la dose 3 $\mu g.g^{-1}$ le t croît d'une manière importante jusqu'à la dose la plus forte (8 $\mu g.g^{-1}$). En regardant les tableaux 45 et 46 nous pouvons déduire que la fertilisation avec 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore peut-être considérée comme le seuil critique au delà duquel le rendement baisse significativement. Quant à la différence entre le sol de rendzine et le sol sur limon, les résultats des tableaux 45 et 46 montrent que le premier est relativement moins influencé par l'excès du bore que le deuxième. Par contre la différence est plus importante entre le sol peu évolué sur alluvion et les deux autres (t = 24,61 en cas de fertilisation avec 8 $\mu g.g^{-1}$ de B pour le sol sur alluvion), en même temps les résultats obtenus montrent que le bore a plus d'effet sur le rendement du sol de rendzine et du sol sur limon que sur celui du sol sur alluvion. Ce résultat est en accord avec le taux de bore soluble à l'eau chaude par rapport au bore total des sols.

Nous donnons dans le tableau 49, à titre d'exemple, la façon dont nous avons réalisé l'analyse et les tests d'analyse de variance; par la suite nous nous contentons de donner comme dans le tableau 50 les résultats du rapport F d'analyse de variance. Pour tout ce travail, nous soulignons dans le tableau 48 le nombre de degré de liberté pour F et le coefficient de corrélation.

TABLEAU 48 - Nombre de degré de liberté pour le test F et le coefficient de corrélation (r).

Sol	Facteur Contrôlé	F		r
		ν_1	ν_1	ν
Sol sur limon + Sol de rendzine	B	3	9	70
	Mn	3	3	70
	Mn + B	9	48	
Sol sur alluvion	B	1	1	13
	Mn	1	1	13
	Mn+B	8	11	

Tableau 49 - Exemple détaillé de l'analyse de variance et des tests d'égalité de variance.

nalyse de variance : Sous-fichier r/Gr--------

Source de Variation	Sommes carrés	D° liberté	Carrés moyens	Fprat	Ftheo
Mn ajouté	17,843[illegible]	3	5,94781	13,30	6,99
B ajouté	16,99233	3	5,66411	12,67	6,99
Interraction:Mn ajo/B ajo	4,02335	9	,44704	117,13	2,80
Répétitions	,18319	48	,00382		
Totale:	39,04231	63			(Prob ,990)

Au niveau de confiance .99 avec ce plan factoriel d'expérience
Interraction:Mn ajo/B ajo influence le résultat de mesure
Mn ajouté influence le resultat de mesure
B ajouté influence le resultat de mesure

Source de variation	Variance	Ecart-type
Mn ajouté	.3438	.5863
B ajouté	.3261	.5710
Interraction:Mn ajo/B ajo	.1108	.3329
Répétitions	.0038	.0618

Resultat global= 2.1850 +/- .8353
Ecart-type global= .4177
Coeff de variation global= 19.11[illegible]
Nbe mesures tot= 64 Niveau confiance(1-alpha/2)= .975 Up= 2

--------Tests égalités des variances -----)Sous fichier r/Gr

Co	Mod	Nui	S2(X-Xbar)	S2x	Ecart-type	Etendue	Moyenne
1	1	2	,0295	,0147	,1214	,2323	3,8228
2	2	2	,0588	,0294	,1715	,3324	6,2851
2	3	2	,0339	,0170	,1302	,2513	5,5478
2	4	2	,0025	,0012	,0350	,0657	1,7202
3	2	2	,0636	,0318	,1783	,3533	6,1507
4	2	2	,0290	,0145	,1204	,2407	2,5574
4	4	2	,0043	,0021	,0462	,0921	2,3200

Test egalité des 7 Modalités: 4 Colonnes 4 Modalités

Test de BARTLETT:

Rtau= 1.9999

Snui	S1/Nu	Effec	C	S.carrés	Snu*LogS2	C*Qui2	Chi2 pr.	Chi2 th.
14	3,500	7	1,1905	,2215	-64,7164	6,6642	5,5979	12,5900

Au niveau de confiance .95
Pas de différence significative entre les variances testées
Test G de COCHRAN -- Test R de HARTLEY

S2maximum	S2minimum	S2totale	Effectif	Test G	Test R
3.1791	1.2254	.1107	7	.2871	25.9435

R théorique 1,67

Tests des étendues
Etendue max= .3533 min= .0657 Somme étendues= 1.5678 Effectif K= 7
Gprim= .2253 Rprim= 5.3774
(K+2)*Gprim= 2.0281

TABLEAU 50 - Influence de la fertilisation en B et en Mn sur la production de biomasse dans les trois sols étudiés au moyen de l'analyse de variance.

1 - Sol de rendzine.

Organe	Fertilisant	Valeurs de F.		
		Sol de rendzine	Sol sur limon	Sol sur alluvion.
GRAINS	B	12,67 *	14,27 *	0,98
	Mn	13,30 *	11,58 *	0,62
	Mn+B	117,13 *	282,17 *	517,40 *
LIMBES	B	9,48 *	15,89 *	1,61
	Mn	9,34 *	10,57 *	0,11
	Mn+B	127,37 *	18,71 *	69,50 *
GAINES	B	14,78 *	10,64 *	3,71
	Mn	9,41 *	9,64 *	0,79
	Mn+B	46,14 *	124,64 *	61,40 *
TIGES	B	10,68 *	12,08 *	1,10
	Mn	9,76 *	8,72 *	0,70 *
	Mn+B	85,07 *	84,57 *	88,66 *

* F = significatif au niveau de probabilité 0,99.

TABLEAU 51 - Coefficients de corrélation (rx1000) entre fertilisation et production de matière sèche des différents organes de blé et entre la production des organes.

	Sol de rendzine *				Sol sur limon *				Sol sur alluvion *			
	Gr	Li	Ga	Ti	Gr	Li	Ga	Ti	Gr	Li	Ga	Ti
B (apporté)	- 683	- 626	- 631	- 695	- 639	- 634	- 517	- 637	- 508	- 370	- 466	- 625
Mn (apporté)	- 649	- 543	- 551	- 658	- 454	- 524	- 504	- 559	- 546	61	- 113	- 517
Gr		909	899	932		870	872	885		895	918	887
Li			961	875			834	879			942	709
Ga				841				884				755

Légende Gr - Grain. Li = Limbe. Ga = Gaine. Ti = Tige

* Coéfficients de corrélation significatifs lorsqu'ils sont > 302 au niveau de probabilité 0,99.

** Coéffocients de corrélation significatifs lorsqu'ils sont > 441 au niveau de probabilité 0,95.

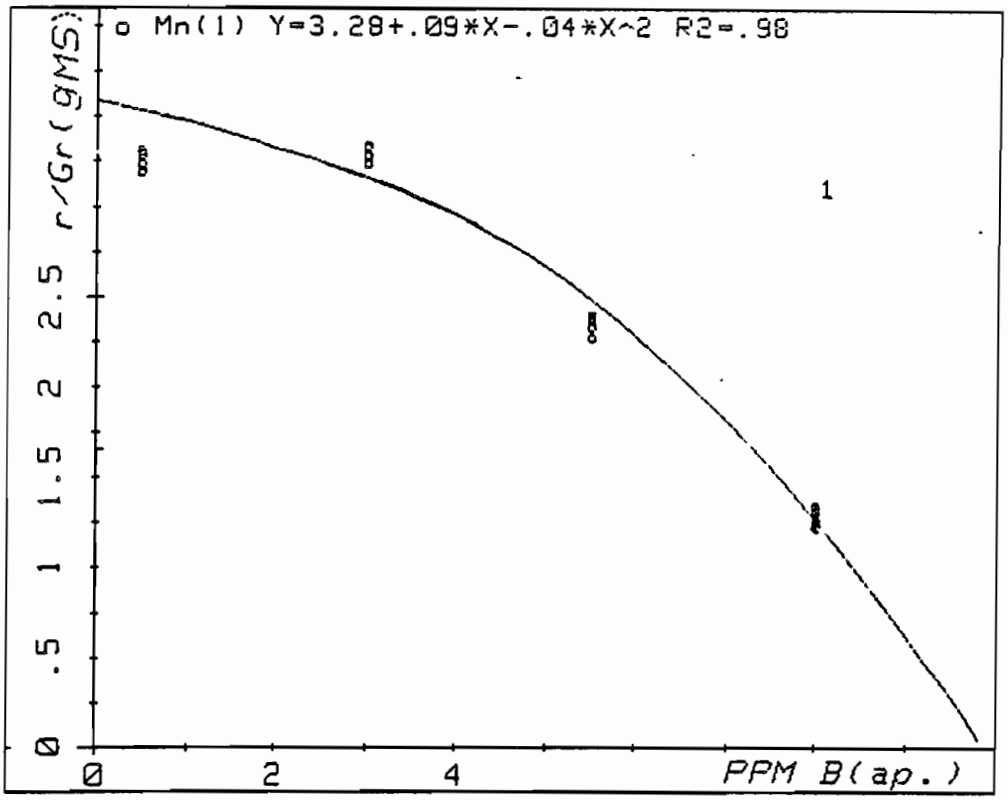
Du tableau 50 nous constatons que la fertilisation en bore a une influence significative sur la baisse de la production de biomasse de tous les organes de blé pour les trois sols.

La différence des valeurs de F n'est pas importante d'un organe à l'autre. Les tests d'égalité de variance ont confirmé la validité de l'analyse de variance.

Pour chercher une relation entre la production de biomasse et la fertilisation en bore, nous avons calculé les coefficients de corrélation donnés dans le tableau 51. Ces coéfficients montrent une corrélation négative et significative entre la production de matière sèche des différents organes et la fertilisation en bore pour les trois sols étudiés. Les coefficients relativement moins forts pour le sol sur alluvion confirment les t moins forts pour ce même sol.
Le tableau 51 montre aussi une corrélation positive et significative entre la production des différents organes.

Au moyen de l'analyse de régression nous avons cherché à déceler la forme de relation entre la dose de la fertilisation en bore et la production de biomasse surtout que les coéfficients de corrélation ont montré l'existence d'une relation entre ces deux variables.

Nous donnons sur la figure 59 les courbes de régression parabolique pour les grains obtenus sur le sol de rendzine et ceux obtenus sur le sol sur limon ; dans le tableau 52 nous regroupons les résultats de l'analyse de régression appropriée pour la production de tous les organes. Il en ressort une relation significative entre la production de la matière sèche des organes et la dose de bore apportée lorsque le manganèse est pris en considération comme facteur constant (dose unique = 1 $\mu g.g^{-1}$ sol). La figure 60 montre également que, lorsque la dose de bore augmente au delà de 3 $\mu g.g^{-1}$, la pente de la courbe devient plus importante.



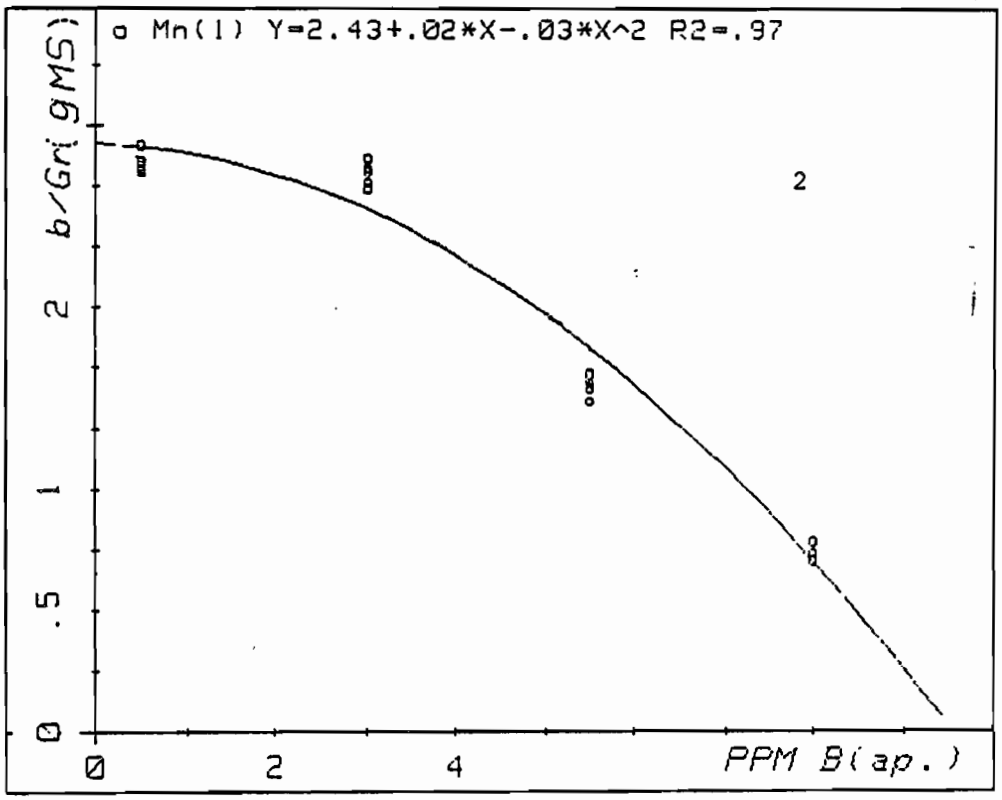


Figure 59 - Relation entre le rendement en grains 1 - sur sol de rendzine (r/Gr (g MS) et 2 - sol sur limon (b/Gr (g MS) et la fertilisation en bore.

TABLEAU 52 - Relation entre rendement en matière sèche et fertilisation en bore en tenant compte d'une fertilisation unique en manganèse (1 $\mu g.G^{-1}$)

Sol de rendzine.		
Organe	$y = Ao + A1\ X + A2\ X^2$	R^2
Grains	$Y = 3,28 + 0,09\ X - 0,04\ X^2$	0,98
Limbes	$Y = 1,52 + 0,06\ X - 0,02\ X^2$	0,99
Gaines	$Y = 1,26 + 0,10\ X - 0,02\ X^2$	0,99
Tiges	$Y = 3,26 - 0,16\ X - 0,00\ X^2$	0,99
Sol sur limon		
Grains	$Y = 2,43 + 0,02X - 0,03X^2$	0,97
Limbes	$Y = 1,04 + 0,03X - 0,01X^2$	0,96
Gaines	$Y = 1,31 + 0,02\ X - 0,01\ X^2$	0,99
Tiges	$Y = 2,26 + 0,10\ X - 0,03\ X^2$	0,99
Sol sur alluvion		
Grains	$Y = 4,80 - 0,15$	0,99
Limbes	$Y = 1,76 - 0,03\ X$	0,93
Gaines	$Y = 1,15 - 0,03\ X$	0,95
Tiges	$Y = 3,24 - 0,08\ X$	0,98

2.3 - Biomasse et fertilisation en manganèse.

Les résultats sont présentés comme pour le bore (alinéa 2.1); sous forme des fichiers des moyennes dans les tableaux 45, 46 et 47. Ils font ressortir des écarts types et des coefficients de variation très acceptables. La fertilisation avec 1 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse donne le meilleur rendement pour les trois types de sols étudiés.

L'excès du manganèse a un effet variable d'un sol à l'autre : une fertilisation avec 6 $\mu g.g^{-1}$ réduit la production des grains de 6,7% sur le sol de rendzine et de 23,8 % sur le sol sur limon. Cette différence importante se vérifie avec 16 $\mu g.g^{-1}$ qui baisse la production respectivement de 56,6 % et de 69,5 %.

Il importe de souligner que cette différence est plus importante que dans le cas de bore. Dans les autres organes les différences sont moins importantes (tableau 45 - modalités 2 et 6).

Les résultats de test "t" donnés dans le tableau 47 montrent une baisse de production de plus en plus importante avec l'augmentation des doses de manganèse au delà de 6 $\mu g.g^{-1}$.

Pour le sol sur alluvion la valeur de t (t = 22,20) est significative au niveau de probabilité 0,975 comme pour les autres sols. Néanmoins, elle est plus faible que celle des autres sols.

Les valeurs de rapport F de l'analyse de variance (tableau 49) montrent une influence significative au niveau de probabilité 0,99 de l'apport de manganèse sur la baisse de la production de la matière sèche de tous les organes des plantes du blé, qu'il soit cultivé sur sol sur alluvion ou sur sol de rendzine ou encore sur sol sur limon.

Les coefficients de corrélation (tableau 51) indiquent l'existence d'une relation significative au niveau de 0,99 entre la fertilisation en manganèse et la baisse de rendement de tous les organes lorsque le blé est cultivé sur sol de rendzine et sol sur limon; cependant, lorsque le blé est cultivé sur sol sur alluvion, cette relation n'est pas significative au niveau de 0,95 pour le rendement des limbes et des graines, ce qui pourrait indiquer un effet moins important du manganèse sur le rendement de ce sol par rapport aux deux autres. D'autre part, l'absence de cette relation est vérifiée par la droite de régression (fig. 60-A) qui jusqu'à la deuxième décimale, ne signale aucune pente dans les deux cas :

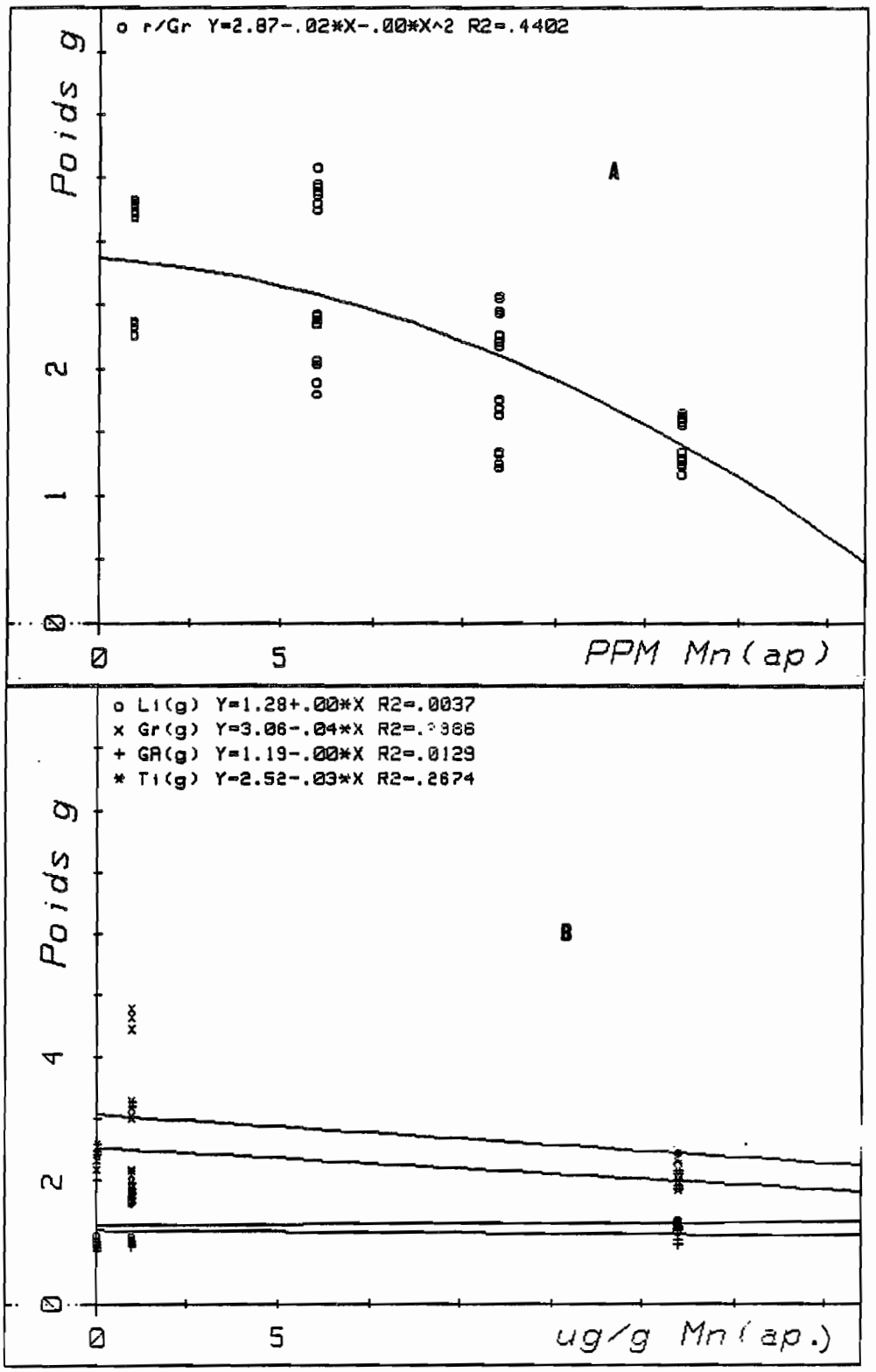


Figure 60 - Relation entre le rendement des grains de blé cultivé A - sur sol de rendzine - B - sur sol sur alluvion et fertilisation en manganèse.

TABLEAU 53 - Relation entre fertilisation en manganèse et rendements des divers organes.

SOL DE RENDZINE.		
Organe	Equation de rendzine	R^2
Grains (Gr)	Y = 2,87 - 0,02 X	0,440
Limbes (Li)	Y = 1,33 - 0,04 X	0,399
Gaines (Ga)	Y = 1,19 - 0,01 X	0,399
Tiges (Ti)	Y = 2,81 - 0,05 X	0,435
SOL SUR LIMON.		
Gr	Y = 2,04 - 0,03 X	0,207
Li	Y = 1,03 - 0,00 X	0,299
Ga	Y = 1,08 - 0,01 X	0,267
Ti	Y = 2,62 - 0,04 X	0,406
SOL SUR ALLUVION.		
Gr	Y = 3,06 - 0,04	0,264
Li	Y = 1,28 - 0,00 X	0,0037
Ga	Y = 1,19 - 0,00 X	0,0129
Ti	Y = 2,52 - 0,03 X	0,267

limbe (Li) Y = 1,28 + 0,00X et gaines (Ga) Y = 1,19 - 0,00X donc une pente B (coefficient de régression de Y en X) de 0 % dans les deux cas.

Le tableau 53 regroupe les résultats de l'analyse de régression, et montre une liaison importante entre le rendement en matière sèche et la fertilisation en manganèse. Cette liaison est illustrée, à titre d'exemple, graphiquement par la courbe de régression (fig.60-B) dans le cas du rendement des grains sur sol de rendzine; on constate que la pente de la courbe est plus importante à partir de la dose 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse.

2.4 - Biomasse et fertilisation simultanée en bore et manganèse.

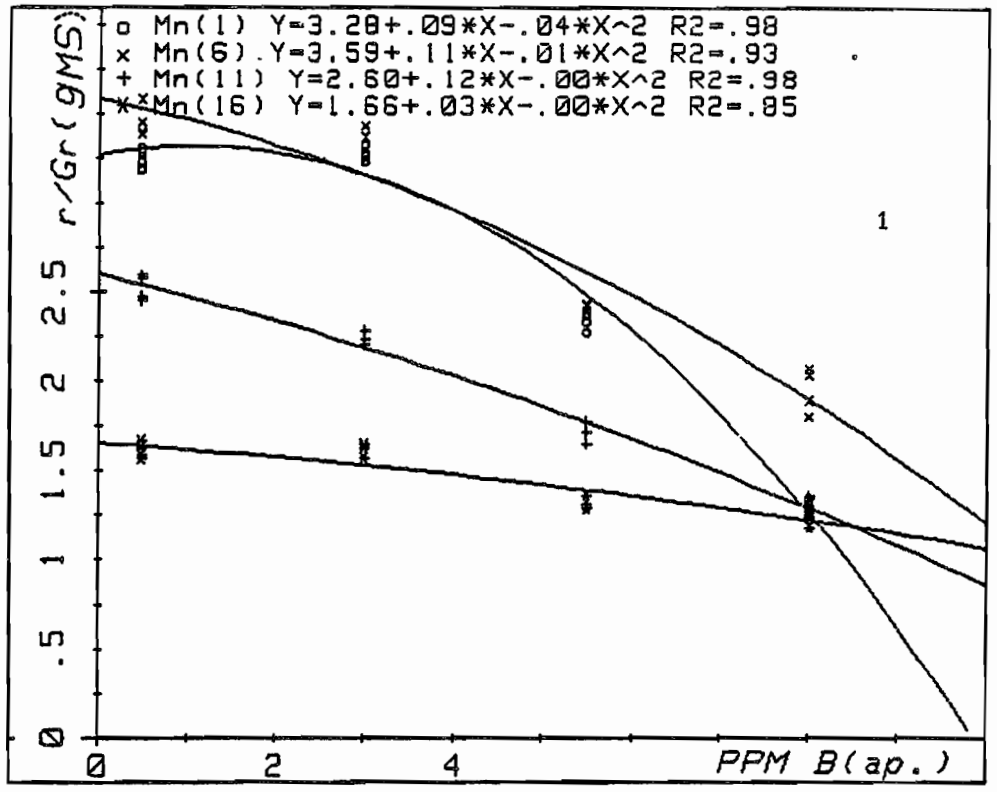
Les résultats exposés aux tableaux 45, 46 et 47 montrent que, pour une dose de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore et 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse, la production de la matière sèche des différents organes décroît moins que l'application d'une dose de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore uniquement, et plus que l'application de 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse uniquement. Pour les limbes dans le cas du sol de rendzine, ces baisses sont respectivement : 11,5% (B et Mn), 27,5 % (B) et 8,3% (Mn). Il est important de noter que les effets varient d'un sol à l'autre et d'un organe à l'autre et que les effets les plus importants sont en général signalés pour le rendement des grains et des tiges et pour le sol sur limon; ils sont les moins importants dans les cultures sur sol sur alluvion. Pour les grains, l'application de 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore et 16 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse baisse le rendement du sol sur alluvion de 47,6% seulement, tandis qu'elle est de 66,4 % pour le sol sur limon et de 69,1 % pour le sol de rendzine. Ces baisses sont toujours moins importantes que lorsque la même dose de bore est appliquée seule et plus importantes que lorsque la même dose de manganèse est appliquée seule.

Le test de student donne des valeurs t (tableau 47) pour toutes les combinaisons des deux oligoéléments appliquées dans nos expériences. Nous pouvons voir qu'une fertilisation composée de 3$\mu g.g^{-1}$ de bore et de 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse n'a pas d'influence significative au niveau de probabilité 0,975 sur le rendement en grains. Par contre une fertilisation composée de 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore et 11 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse a une influence significative sur la baisse de rendement en grains. Cette influence paraît moins importante que l'application de cette même dose

de bore seule, mais elle est plus importante que celle de l'application de la même dose de manganèse seule. Il en est de même avec les autres combinaisons, ce qui prouve qu'il n'existe pas une action additive de bore et de manganèse quand ils sont appliqués ensemble mais une action soustractive, ceci bien entendu dans le cas où les doses des deux oligoéléments ont un effet significatif. La combinaison des deux éléments a toujours un effet significatif même si l'une des deux doses appliquées seules ne l'a pas, ceci donne, comme nous le verrons, plus d'importance à l'effet global de l'interaction Mn+B calculé par l'ananlyse de variance (voir tableau 47); cet effet soustractif s'étend au sol sur alluvion avec une valeur de t moins important en cas d'une fertilisation à 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore et 16 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse (pour cette seule combinaison la valeur de t = 20,24 est significative au niveau de probabilité 0,975); on constate aussi que la valeur de t est plus faible pour ce sol (sol sur alluvion) que pour les deux autres. Cependant, l'ensemble des combinaisons Mn+B révèle une importante valeur de F d'interaction globale Mn+B décelée par l'analyse de variance. Cette forte valeur, tout en indiquant une interaction entre les deux éléments peut-être due en partie également à la bonne reproductibilité des répétitions et à leur nombre suffisant.

L'influence significative de l'interaction Mn+B sur le rendement varie, comme celle du bore ou du manganèse séparé, d'un organe à l'autre et d'un sol à l'autre (tableau 50).

L'analyse de régression donne une idée intéressante de l'allure de ces interactions Mn+B sur la production de matière sèche comme le montrent les figures 6 1-1 et 2 dans le cas des grains pour les deux sols. Les équations de régression parabolique (tableau 54) montrent l'effet de la fertilisation, excessive bore manganèse sur la baisse du rendement des divers organes de blé.



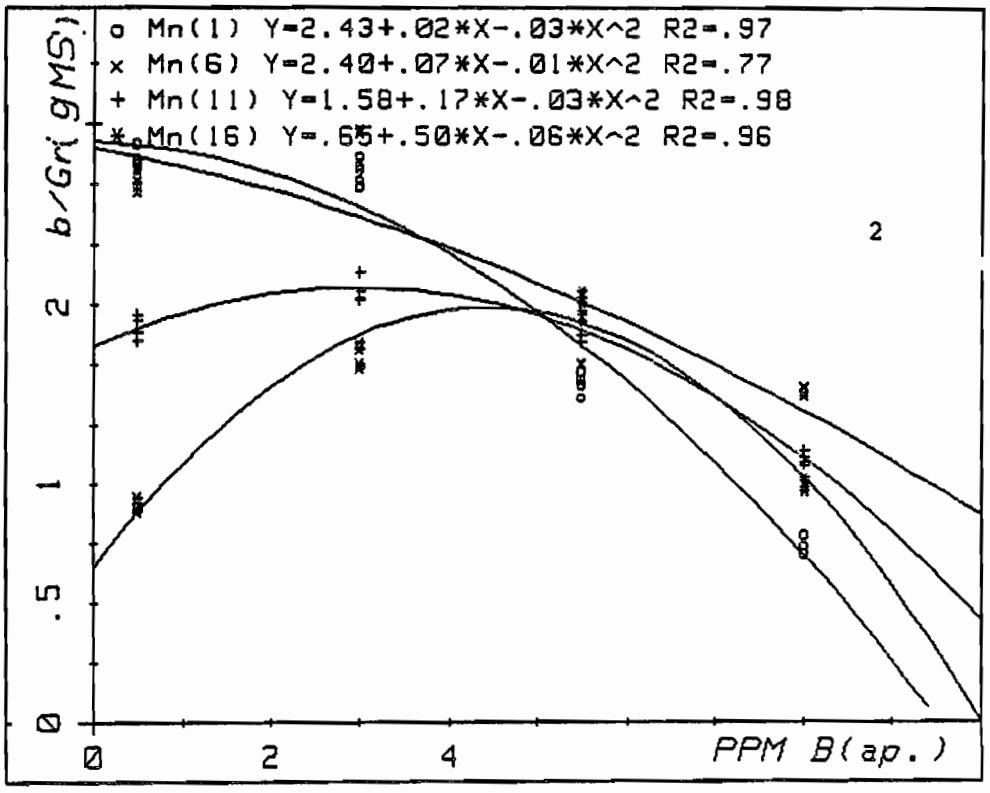


Figure 61 - Relation entre le rendement des grains de blé cultivé - 1 - sur de rendzine et 2 - sur sol sur limon et l'interaction bore et manganèse.

TABLEAU 54 - relation entre rendement et interaction bore-manganèse.

Organe	Interaction	Equation de régression			
		Sol de rendzine	R2	Sol sur limon	R2
Gr	1	$Y = 3,59 + 0,11 X - 0,01 X^2$	0,93	$Y = 2,40 + 0,07 X - 0,01 X^2$	0,77
	2	$Y = 2,60 + 0,12 X - 0,00 X^2$	0,98	$Y = 1,58 + 0,17 X - 0,03 X^2$	0,98
	3	$Y = 1,66 + 0,03 X - 0,00 X^2$	0,85	$Y = 0,65 + 0,50 X - 0,06 X^2$	0,96
Li	1	$Y = 1,53 + 0,11 X - 0,02 X^2$	0,96	$Y = 1,06 + 0,03 X - 0,02 X^2$	0,77
	2	$Y = 1,50 + 0,03 X - 0,02 X^2$	0,99	$Y = 0,92 + 0,09 X - 0,02 X^2$	0,96
	3	$Y = 0,73 + 0,07 X - 0,01 X^2$	0,83	$Y = 0,65 + 0,12 - 0,02 X^2$	0,84
Ga	1	$Y = 1,19 + 0,10 X - 0,02 X^2$	0,96	$Y = 1,38 + 0,02 X - 0,01 X^2$	0,98
	2	$Y = 1,19 + 0,07 X - 0,02 X^2$	0,95	$Y = 0,97 + 0,09 X - 0,01 X^2$	0,67
	3	$Y = 0,75 + 0,08 X - 0,01 X^2$	0,84	$Y = 0,59 + 0,14 X - 0,01 X^2$	0,96
Ti	1	$Y = 2,96 - 0,00 X - 0,02 X^2$	0,98	$Y = 2,04 + 0,12 X - 0,02 X^2$	0,99
	2	$Y = 2,13 + 0,23 X - 0,04 X^2$	0,94	$Y = 2,05 + 0,04 X - 0,01 X^2$	0,93
	3	$Y = 1,86 - 0,03 X - 0,00 X^2$	0,91	$Y = 1,10 + 0,25 X - 0,03 X^2$	0,66

1 - Interaction entre 6 $\mu g.g^{-1}$ du manganèse et toutes les doses de bore.
2 - " " 11 $\mu g.g^{-1}$ " " "
3 - " 16 $\mu g.g^{-1}$ " " "

3 - PRODUCTION DE BIOMASSE, STADE DE DEVELOPPEMENT ET FERTILISATION EN BORE ET EN MANGANESE.

Nous étudions ici l'influence de la fertilisation en bore ou en manganèse ou en bore et manganèse sur le rendement dans des stades différents et importants du cycle du blé. Les résultats de cette étude sont réprésentés par les histogrammes des figures 62, 63, 64, 65.

La figure 62 nous montre l'effet des différentes doses de fertilisation sur la production des limbes. Il apparaît qu'en cas de fertilisation complète (F.C) par rapport au cas de fertilité naturelle spécifique (F.N.S.), les limbes accroissent plus leur poids sec au stade floraison qu'au ~~stade~~ début de tallage (Fig. 62, traitements 1 et 2) et même en cas de fertilisation avec 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore ou avec 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse (Fig. 62, traitements 3 et 4) pour les limbes du blé cultivé sur sol de rendzine. Il ressort aussi que ces deux dernières doses réduisent davantage le poids des limbes de blé cultivé sur sol sur limon que sur sol de rendzine pour le stade maturation. Les autres(doses malgré leur importance plus grande dans le cas du sol de rendzine) réduisent le rendement de tous les stades et davantage le poids sec des limbes dans le cas du blé cultivé sur sol sur limon que sur sol de rendzine par rapport à leur F.C respective, ce qui prouve que ce résultat déjà trouvé pour le stade de maturation est valable pour les deux autres stades. Au stade début de tallage, même les doses les plus fortes (fig. 62 traitements 5,6 et 7) affectent moins les limbes par rapport au stade floraison et au stade maturation. En général la production des limbes est plus importante dans le cas du sol sur limon que dans celui du sol de rendzine.

La figure 63 montre l'effet des différentes doses de bore et de manganèse sur la production des gaines. Nous pouvons voir que les gaines comme les limbes profitent plus de la fertilisation complète (F.C) au stade floraison qu'au stade début de tallage et même dans le cas de fertilisation avec 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore ou avec 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse, surtout sur sol de rendzine (Fig.63, traitements 1,2,3 et 4). Nous constatons aussi que la décroissance de la matière sèche des gaines est moins importante au stade début de tallage lors d'application excessive du bore et de manganèse (fig. 63, traitements, 5, 6 et 7) et pour le sol

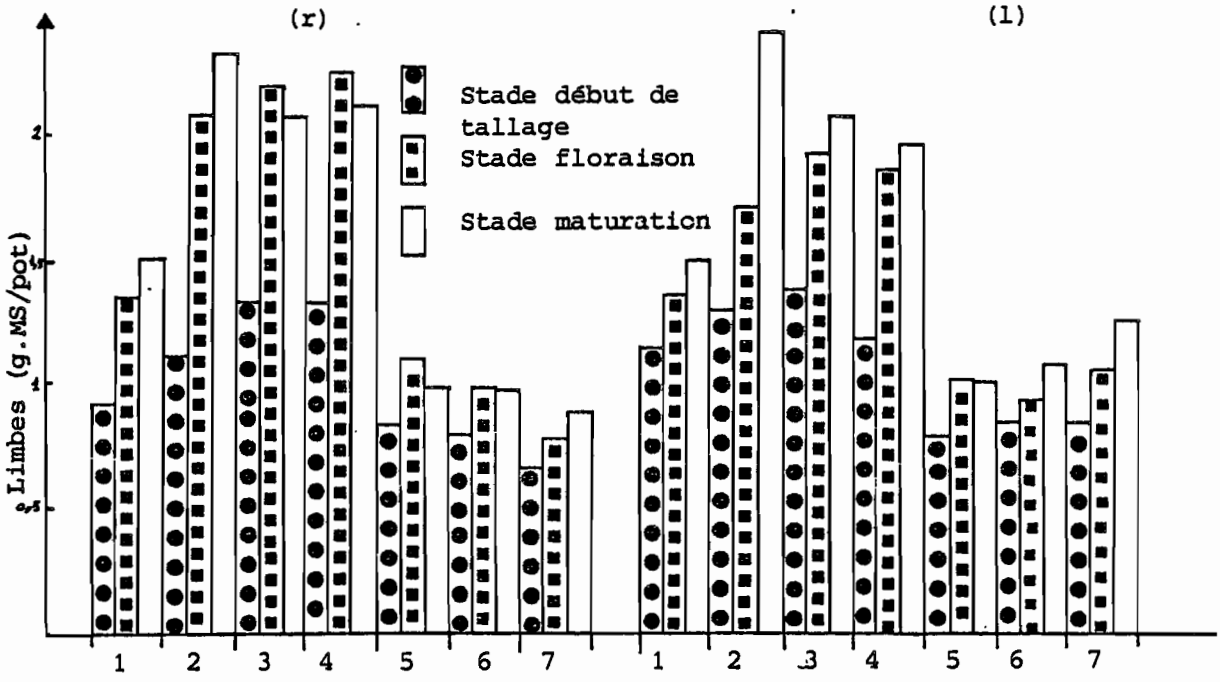


Figure 62 - Effet de la fertilisation avec différentes doses de bore et de manganèse sur la production de la matière sèche (M.S/pot) des limbes de blé cultivé sur sol de rendzine (r) et sur sol sur limon (l)

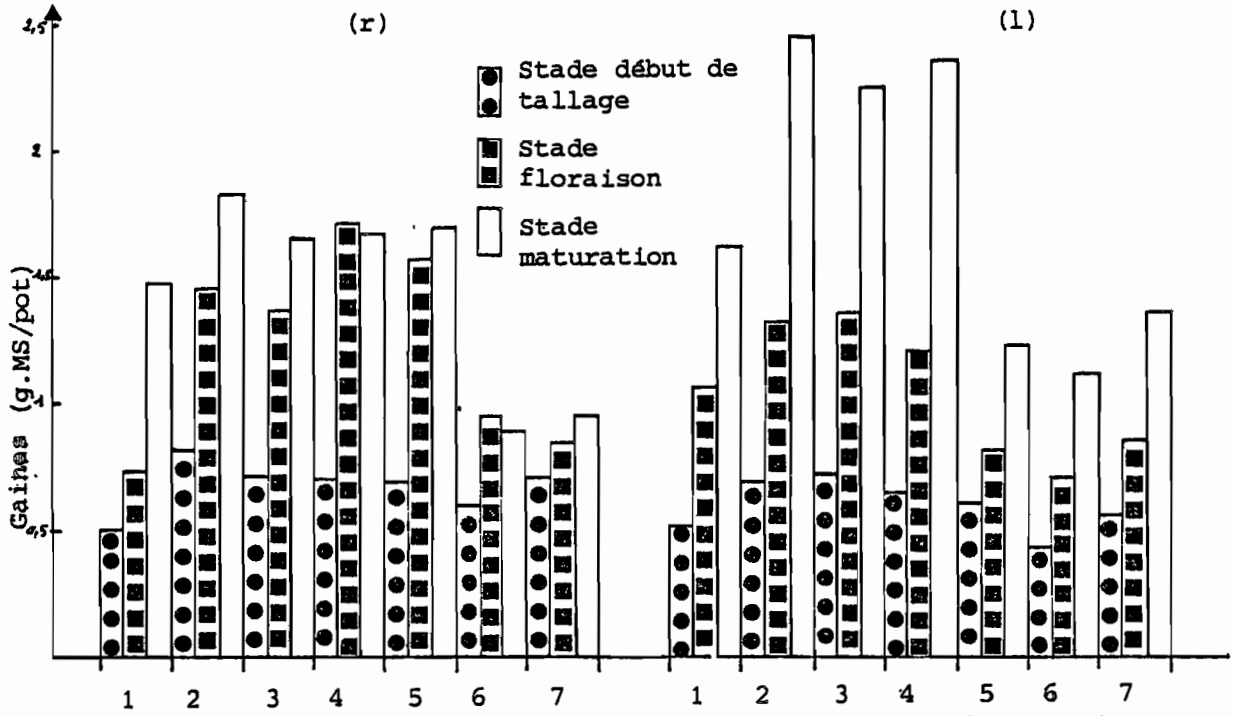


Figure 63 - Effet de la fertilisation avec différentes doses de bore et de manganèse sur la production de matière sèche (M.S/pot) des gaines de blé sur sol de rendzine (r) et sur sol sur limon (l).

Légende : 1 - F.N.S. (0µg.g^{-1}B et 0µg.g^{-1} mn). 2 - F.C. (0,5µg.g^{-1}B et 1 µg.g^{-1}Mn). 3 - 3,03B et 1,0Mn. 4 - 0,5B et 6,0 Mn. 5 - 8,0B et 16 Mn sol (l) ou 10,5B et 21 Mn sol (r). 6 - 8,0B et 1,0 Mn. 7 - 0,5 B et 16 Mn sol (l), ou 0,5 et 21 Mn sol (r).

sur limon et celui de rendzine. Enfin, nous soulignons que la production de matière sèche des gaines est, comme pour les limbes, plus importante dans le cas de culture de blé sur sol sur limon que sur sol de rendzine, ce qui peut expliquer l'indice de récolte moins important trouvé précédemment pour le sol sur limon.

La figure 64 montre l'effet des différentes doses de bore et de manganèse sur le rendement des tiges pour les deux sols. On note que les doses 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore et 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse affectent peu le rendement des tiges au stade floraison et au stade maturation (fig. 64 traitements 3 et 4). On constate aussi que c'est l'effet du bore (8 $\mu g.g^{-1}$) qui s'avère le plus important, car à cette dose le rendement des tiges décroît le plus aux deux stades et pour les deux sols. L'effet du bore et du manganèse, lorsqu'ils sont appliqués ensemble, est intermédiaire par rapport à leur application séparée. Il ressort aussi de la figure 64 que la F.N.S. du sol de rendzine est nettement plus importante que celle du sol sur limon.

Sur la figure 65, les résultats du stade floraison sont représentés par le poids sec des épis entiers car, à ce stade (apparition du premier pollen), les grains ne sont pas encore remplis et leur poids est par conséquent négligeable; donc, ici, on utilisera le rendement des grains seulement pour le stade de maturation.

Le poids des épis est plus grand lorsque le blé est cultivé sur sol de rendzine que sur sol sur limon (F.N.S. moins importante); ceci s'applique aussi au rendement des grains au stade maturation, ce qui augmente l'indice de récolte du sol de rendzine. Nous avons trouvé que l'application d'une dose forte de bore affecte plus le rendement absolu des grains dans le cas du sol sur limon que dans celui du sol de rendzine même lorsque la dose appliquée est moins forte (sol sur limon 8 $\mu g.g^{-1}$, sol de rendzine 10,5 $\mu g.g^{-1}$). Pour ces doses le rendement du sol sur limon est inférieur de 41,7 % au sol de rendzine.

L'application de la plus forte dose de bore et la plus forte dose de manganèse simultanément décroît le poids des épis et le rendement des grains d'une manière intermédiaire par rapport à l'application séparée de ces doses et ceci pour les deux sols.

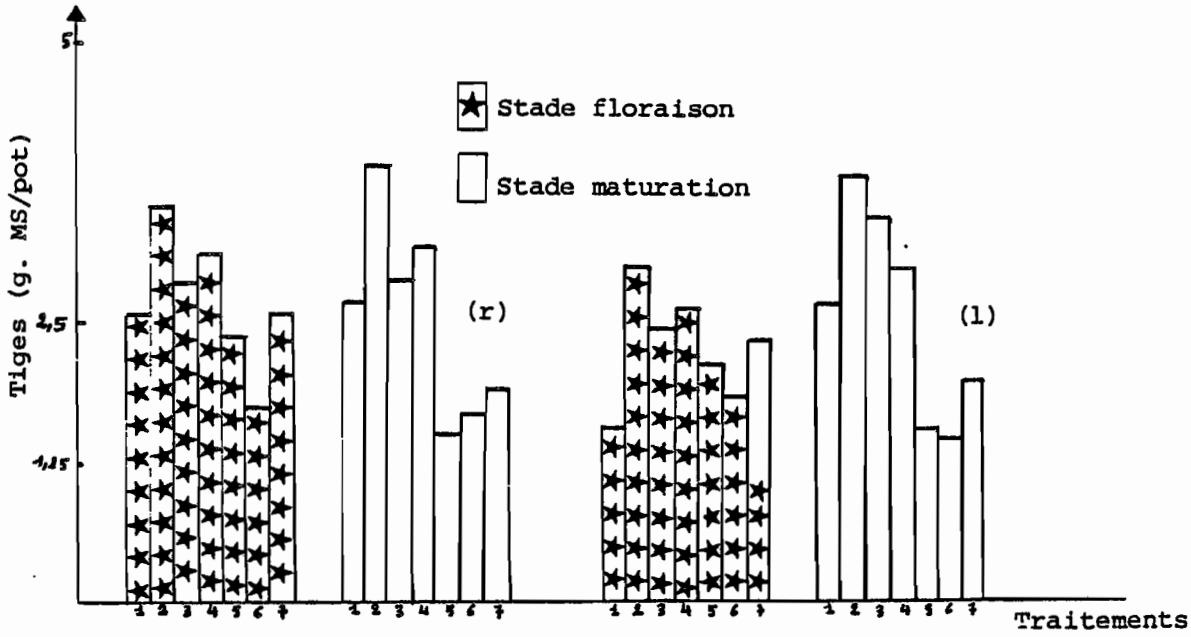


Figure 64 - Effet de la fertilisation avec différentes doses de bore et de manganèse sur la production de matière sèche (g.Ms/pot) des tiges du blé cultivé sur sol de rendzine (r) et sur sol sur limon (l).

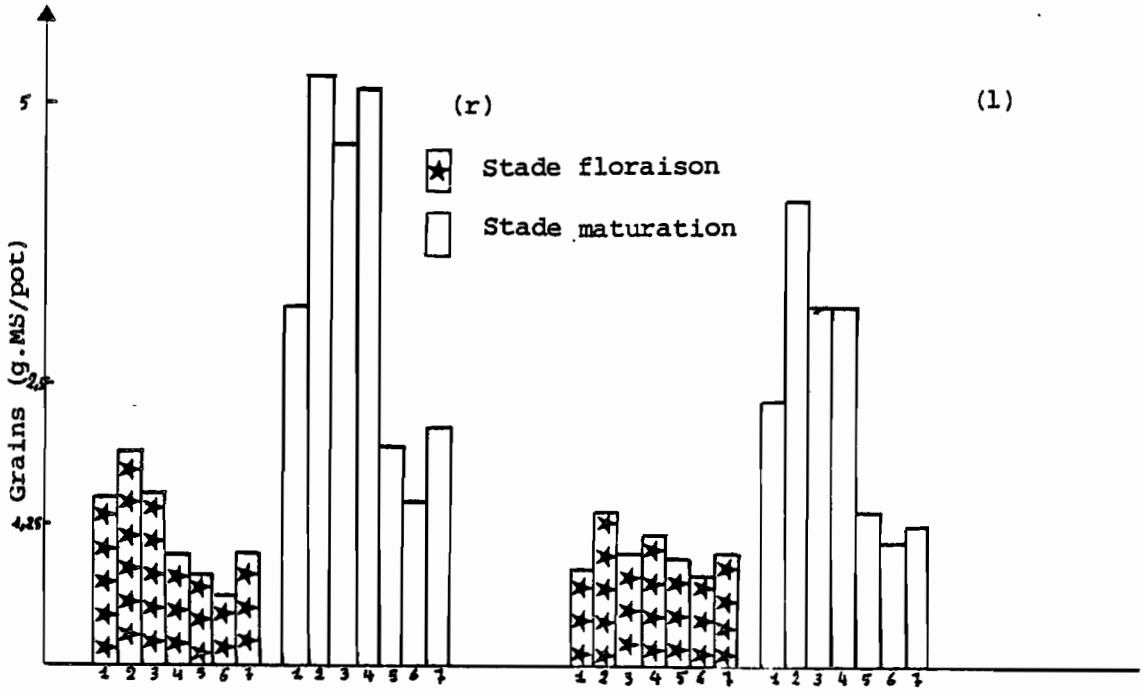


Figure 65 - Effet de la fertilisation avec différentes doses de bore et de manganèse sur le rendement des grains (maturation) et des épis entiers (stade floraison) de blé cultivé sur sol de rendzine (r) et sur sol de limon (l).

VII - 4 - *INTERPRETATION*

4.1 - Essai d'interprétation comparative de la fertilité et de la production entre sol de région tempérée et sol de région aride.

Nous avons trouvé que le sol peu évolué sur alluvion de la basse vallée de l'Euphrate au N.E.Syrien (région aride, chapitre II) présente un rendement des grains ou de paille (tige + gaines + limbes), inférieur à ceux du sol brun lessivé sur limon et du sol rendzine sur calcaire tous deux de Grignon (région tempérée voir chapitre II). La différence décelée au moyen du test t (tableau 42) est significative pour le rendement de tous les organes en cas de F.N.S. (valeurs des t nettement supérieures à la limite donnée par la loi de student au niveau de probabilité 0,975). Ce même test prouve (tableau 43) que l'amélioration de la capacité potentielle de production est significativement plus faible pour ce sol sur alluvion de région aride par rapport aux sols étudiés de région tempérée.

Tous ces résultats montrent d'une manière indubitable la faible fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) et la faible réponse à la fertilisation complète (FC) du sol venant de région aride syrienne, importante dans l'agriculture du pays. Lorsque l'on cherche à connaître l'origine de cette pauvreté, on doit regarder le bilan nutritif analytique et les autres caractéristiques de ce sol donné dans le chapitre II et les comparer avec ceux des deux autres sols de la région tempérée. Ce bilan examiné de près permet de noter les points suivants concernant le sol sur alluvion :

1- pH le plus élevé (8,5).
2 - structure très mauvaise (I S = 5,5).
3 - Texture plus fine donc adsorption plus forte des éléments à la surface de ces particules fines.
4 - Très faible teneur en matière organique (1,1%) et en azote.
5 - Les smectites en grande partie de montmorillonite à capacité d'échange cationique élevée sont ici peu abondantes par rapport à leur teneur dans les autres sols (le rapport en

smectites entre ce sol et le sol de rendzine et le sol sur limon est respectivement de 1 : 2 et 1 : 2,7).

Tous ces traits ne sont guère favorables à un bon rendement et ont pour conséquence une faible fertilité de ce sol, bien que sa capacité d'échange cationique (C.E.C. = 19 méq/100g sol) soit relativement élevée. Sa teneur en oligoéléments totaux est plus élevée que celles des sols de région tempérée mais les teneurs en oligoéléments extractibles sont plus faibles dans ce sol (tableau 25, chap. IV).En fait nous pouvons avancer l'hypothèse que les points cités ci-dessus pourraient expliquer l'influence moins importante des mêmes excès en bore et en manganèse sur ce sol par rapport à ceux des régions tempérées.En réalité l'application de 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore décroît le rendement des grains du blé cultivé sur sol sur alluvion de 53,5 % tandis que cette même dose le décroît de 73,6 % pour le sol sur limon et de 72,6 % dans le cas du sol de rendzine. Il est probable que les raisons qui diminuent la fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) de ce sol de région aride faible, diminuent en même temps l'influence des excès en bore et en manganèse.

4.2 - Fertilisation en bore et rendement.

Les expériences ont montré qu'une fertilisation avec 0,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore peut correspondre à un seuil optimal dans les trois sols étudiés, les sols n'ayant pas atteint leur rendement potentiel lors de l'absence de fertilisation borique et ayant montré une baisse relative du rendement avec la dose suivante (3 $\mu g.g^{-1}$) : la baisse du rendement total est de 16,2 % pour le blé cultivé sur sol de rendzine et de 17,6 % pour le blé cultivé sur sol sur limon. Il est très important de souligner que ce résultat ne doit en aucun cas inciter à une fertilisation avec 3 $\mu g.g^{-1}$, qui mène à une accumulation dans le temps et par conséquent, même à courte échéance, à l'apparition éventuelle d'une toxicité suite à cette accumulation successive, qui peut polluer aussi l'eau souterraine. Ceci par suite de l'élution du bore à l'eau comme nous l'avons observé dans l'expérience d'élution sur colonne (chapitre V), ce qui nous mènerait à un cycle fermé de pollution. D'autre part, GUPTA (1971) a rapporté que la culture du blé en serres a montré que l'application de 1 $\mu g.g^{-1}$ du bore dans un type de sol (non précisé par l'auteur) a réduit le rendement de blé et de l'orge. SHERREL (1983) a trouvé que 4 $\mu g.g^{-1}$ réduit faiblement la production de certaines variétés de trèfle et de luzerne.

Nous avons trouvé que, pour les autres doses excessives de bore (5,5 et 8 $\mu g.g^{-1}$), la production de biomasse baisse dans tous les stades de développement de la plante d'une façon très significative comme l'ont montré toutes les analyses statistiques et avec un niveau de probabilité très élevé 0,99. Cette décroissance devient linéaire à partir de la dose 5,5$\mu g.g^{-1}$. Il ressort donc que la dose de 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore sera le seuil critique au delà duquel l'influence du bore devient très significativement négative comme la courbe de régression l'exprime. Cette influence est en relation directe avec le développement des symptômes visibles aigus aux doses signalées, comme nous l'avons montré au chapitre VI. L'influence du bore est aussi en relation avec la baisse de chlorophylle indiquée dans ce même chapitre. Ceci qui réduit l'intensité de la photosynthèse et par conséquent l'accumulation de la matière sèche (MOHAPATRA, et al. 1982) aux différents stades notamment celui de floraison, ce qui a des conséquences très importantes sur la maturation. Le rôle du bore dans la synthèse des acides nucléiques (CORY et al., 1966), dans le mécanisme d'intervention de l'eau à l'intérieur de la plante, dans le transport des sucres (GUPTA, 1979) et dans la réduction des longueurs des plantes est un facteur négatif menant à une décroissance très importante du rendement dans les différents stades de développement.

Les trois sols peuvent être classés quant à l'influence du bore dans l'ordre décroissant suivant : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion; les deux derniers sols sont riches en calcaire tandis que le premier n'en contient que des traces et a le pH le plus faible. GUPTA et MACLEOD (1981) ont trouvé que l'application de calcaire modère l'effet du bore sur la production de matière sèche. BARTLETT et PICARELLI (1973) ont conseillé l'ajout de calcaire contre la toxicité en bore. PETERSON et NEWMAN (1976) ont rapporté que le pH au delà de 7,4 réduit la disponibilité du bore dans les sols. A côté de nombreux travaux importants concernant l'influence du bore sur le développement des différentes cultures (BURGEVIN et FOEX, 1937, GENEVOIS, 1971; KHAN et RYAN, 1978), peu d'auteurs se sont intéressés à étudier la relation entre le rendement des grains et les rendements des autres organes du blé en fonction de la fertilisation en bore. L'influence relativement plus importante de l'excès du bore sur les grains que sur les autres organes n'est pas significative et une relation étroite existe entre le rendement des différents organes. BOIFFIN et al., (1976), SEBILLOTTE (1978) ont trouvé,

d'une façon générale, une telle relation entre le nombre des grains du blé et la matière sèche à la récolte. D'autre part, ce travail a fait ressortir la relation entre croissance et rendement. Nous avons trouvé que le taux de réduction du rendement en grains suit celui des tiges. RAWSON (1971) a trouvé une relation de type linéaire entre la matière sèche d'une tige à l'épiaison et le poids de grains qu'elle produit.

4.3 - Fertilisation en manganèse et rendement.

Les résultats font apparaître que le meilleur rendement est obtenu lorsque nous fertilisons avec 1 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse, la production de blé n'ayant pas atteint son rendement potentiel sans fertilisation en manganèse et ayant baissé dans tous les sols lors d'une fertilisation avec la dose suivante (6 $\mu g.g^{-1}$). Le meilleur rendement avec 1 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse est obtenu sur le sol de rendzine ce qui correspond à ses caractéristiques (structure, texture, C.E.C., matière organique ... chapitre II), meilleures que celles des deux autres. Le rendement en grains du blé de ce sol est moins affecté que sur sol sur limon par la fertilisation avec 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse; ceci est en concordance avec la capacité de rétention du manganèse plus élevée pour le sol de rendzine que pour les deux autres (taux de Mn extrait par l'acide chlorhydrique par rapport au Mn total plus faible, tableau 25 chap. IV) et avec un pH plus élevé; ce qui permet de conclure que dans un sol, plus le taux de manganèse extractible est faible et le pH élevé moins le rendement est affecté. Le calcaire réduit l'absorption du manganèse. JONES et NELSON, (1982); PATIL et PATIL, (1981); HAROUN et al., (1978) ont trouvé que l'application de 4 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse sur sol calcaire augmente le rendement de matière fraîche de haricot. Le fait que le sol de rendzine avait une teneur importante en calcaire (22,7 %) tandis que le sol sur limon n'en contenait que des traces confirment l'influence moins importante d'une dose de 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse sur le rendement du sol de rendzine par rapport au sol sur limon.

Nous avons montré que au delà de la dose 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse le rendement décroissait significativement (fig.61), ce qui est en accord avec l'évolution des symptômes et le ralentissement de la croissance et du développement constaté au chapitre VI. Le test t a montré le comportement des deux vis-à-vis de l'application du manganèse. Le rendement de blé sur sol sur alluvion est encore différent des deux précédents : il est

moins affecté. En réalité le sol sur alluvion est encore plus riche en calcaire et a le pH le plus élevé avec un taux de manganèse extractible plus faible par rapport aux deux autres sols, ce qui appuie le raisonnement donné ci-dessus; de même KHAN et RYAN (1978) ont trouvé dans les sols calcaires libanais que plus la teneur en calcaire augmente, moins le manganèse est disponible. Les trois sols peuvent être classés selon leur sensibilité à l'excès de manganèse comme suit : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion. Ce classement est prouvé par les analyses statistiques au stade de maturation, mais l'expérience avec les autres stades de développement l'a prouvé aussi. L'analyse de variance et l'analyse de régression ont permis de déceler une influence plus importante du manganèse ajouté sur le rendement des grains que sur celui des autres organes. En fait, le rendement en grains reflète la répercussion apparemment cumulative de l'ensemble des effets sur le rendement des autres organes, le rendement en grains étant le résultat du développement et de la croissance de la plante.

4.4 - Relation entre bore et manganèse appliqués et rendement.

Les études concernant l'effet de la relation entre le bore et le manganèse appliqués ensemble sur le rendement de blé ne sont pas abondantes. Cette étude a montré que dans les trois sols l'application simultanée du bore et du manganèse en concentrations différentes ne donnerait pas le même résultat que leur application séparée. Nous avons remarqué que l'application simultanée avait un effet intermédiaire entre celui du bore et celui du manganèse appliqués séparément. Cet effet est plus important que celui du manganèse et moins important que celui du bore, ce qui permet de penser que le bore est plus toxique que le manganèse. Les différentes doses combinées de ces oligoéléments ont décelé systématiquement, et dans les différents stades de développement cet effet intermédiaire. Ceci révèle donc une interaction soustractive entre ces deux éléments. Cette interaction est plus ou moins prononcée d'un sol à l'autre. L'importance de cette interaction est en relation avec les caractéristiques des sols, discutées dans les paragraphes 4-2 et 4-3. L'influence plus prononcée du bore sur la réduction du rendement de matière sèche du blé par rapport à celle du manganèse est très probablement en relation avec la solubilité plus importante du bore à l'eau que

celle du manganèse (chap.V), ce qui augmenterait le bore disponible aux plantes (GUPTA, 1979). Il n'est pas exclu que l'interaction se passe aussi dans les tissus des plantes et modifie l'accumulation de la matière sèche. Les prélèvements des plantes aux stades début de tallage et floraison ont permis de montrer que les variations des effets d'un sol à l'autre sont semblables à celles trouvées au stade maturation. Néanmoins, au stade début de tallage, le rendement est moins affecté que celui des deux autres stades par les différentes doses appliquées de bore et de manganèse; d'ores et déjà ce résultat concorde avec les symptômes peu prononcés que nous avons remarqués à ce stade. Nous avons trouvé aussi que l'influence des différentes doses n'était pas le même sur tous les stades : la dose 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore affecte moins le stade début de tallage que le stade maturation . YADAV et MANCHANDA (1979) ont trouvé que la dose 1,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore, appliquée à un sol sableux non calcaire, affectait la production de la matière sèche de blé six semaines après le semis, tandis que cette dose n'avait pas d'effet sur le stade maturation. Ces auteurs ont montré aussi, comme nous l'avons noté, que la fertilisation avec 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore baissait la production des grains et de paille; ils ont montré également que le rendement en grains était relativement plus affecté que celui des autres organes.

VII - 5 - *CONCLUSION*

Les résultats exposés nous permettent de faire ressortir que la fertilité naturelle spécifique (F.N.S.) pour les trois sols expérimentés diminue dans l'ordre suivant: sol de rendzine > sol sur limon> sol sur alluvion. Pour l'indice de récolte l'ordre devient : sol sur limon > sol de rendzine>sol sur alluvion; il en est de même pour la fertilisation complète (FC). Nous avons pu établir la dose optimale de fertilisation en bore et en manganèse pour les trois sols : 0,5 $\mu g.g^{-1}$ pour le bore et de 1 $\mu g.g^{-1}$ pour le manganèse. Nous avons montré également que le blé n'est pas une plante particulièrement sensible à la toxicité du bore ni à celle du manganèse; cependant, une relation négative et significative a été mise en évidence entre un fort excès de bore et de manganèse et le rendement du blé sur les trois sols étudiés notamment celui sur limon. La réduction du rendement est particulièrement prononcée au delà de 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore ou de 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse; cette réduction est généralement plus importante pour les autres organes. Le bore a plus d'influence sur la baisse de rendement que le manganèse. L'application simultanée du bore et du manganèse en doses excessives montre une interaction soustractive des deux oligoéléments qui se répercute par une influence intermédiaire sur la décroissance du rendement.

L'influence significative de l'excès de bore ou de manganèse, si l'on compare les trois sols, aboutit à un classement différent : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion ; cela est en relation avec les caractéristiques de chaque sol.

Le stade floraison serait le stade qui annonce le mieux l'effet toxique du manganèse du bore sur le rendement final de la plante.

CHAPITRE VIII

ALIMENTATION OLIGOMINERALE DE PLANTE.

CHAPITRE VIII

ALIMENTATION OLIGOMINERALE DE PLANTE.

VIII.1 - PRELEVEMENT, MIGRATION ET ACCUMULATION DES ELEMENTS NUTRITIFS DANS LES PLANTES EN FONCTION DES DOSES APPLIQUEES DU BORE ET DU MANGANESE.

Le nombre des éléments étudiés ainsi que celui des organes des plantes étant important (9 éléments et 5 organes), nous allons essayer de simplifier autant que possible la présentation des résultats. Ils seront donnés élément par élément, en commençant par les oligoéléments. Pour chaque élément, les résultats de chaque organe, en fonction du bore et du manganèse appliqués, seront donnés séparément. Les organes seront traités dans l'ordre suivant : 1 - racines, 2 - tiges, 3 - gaines, 4 - limbes et 5 - graines. Tous ces résultats ont été traités statistiquement comme nous l'avons décrit au chapitre VII ; ces traitements statistiques seront donnés dans le même ordre de leur description.

VIII.1.1. Bore.

1.1.1. Prélèvement, migration et accumulation du bore dans les racines.

Nos résultats montrent que les racines sont incontestablement les plus riches en bore parmi tous les organes (tableau 55) ; ceci indique que le bore prélevé par les racines migre faiblement vers les autres organes en cas de fertilisation avec 0,5 $\mu g.g^{-1}$ du bore ; néanmoins, les particules fines du sol qui restent collées aux racines, malgré toutes les précautions prises, pourraient participer à l'enrichissement des racines en bore. Le tableau 55 nous indique aussi que lorsque l'on ajoute un excès de bore les racines ne s'enrichissent pas d'une façon très notable ; en cas d'application de 8 $\mu g.g^{-1}$ du bore, la teneur des racines n'augmente que de 2,4 fois en cas du sol sur limon dans lequel les racines, comme les autres organes, accumulent plus

Tableau 55 - Moyennes ($\mu g.g^{-1}$ de matière sèche), écarts-types et coéfficients de variations (C.V.%) des variations des teneurs en bore dans les différents organes en fonction des doses appliquées en bore et en manganèse
A - sol brun lessivé sur limon.

Modalité*	Colonne**	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1 B111	B/Li	4	66.40	4.18	6.30%
1 B111	B/Ra	4	133.04	2.69	2.03%
1 B111	B/Gr	4	1.45	.10	6.90%
1 B111	B/Ga	4	38.97	.89	2.28%
1 B111	B/Ti	4	8.28	.49	5.87%
2 B121	B/Li	4	65.61	1.09	1.67%
2 B121	B/Ra	4	139.38	1.59	1.14%
2 B121	B/Gr	4	1.42	.09	6.15%
2 B121	B/Ga	4	31.51	2.52	8.00%
2 B121	B/Ti	4	7.85	.30	3.82%
3 B131	B/Li	4	82.19	3.06	3.73%
3 B131	B/Ra	4	155.59	2.10	1.35%
3 B131	B/Gr	4	4.53	.45	9.94%
3 B131	B/Ga	4	44.45	1.37	3.07%
3 B131	B/Ti	4	13.40	.49	3.66%
4 B141	B/Li	4	91.89	1.79	1.94%
4 B141	B/Ra	4	156.10	3.20	2.05%
4 B141	B/Gr	4	2.23	.15	6.74%
4 B141	B/Ga	4	39.58	23.20	58.61%
4 B141	B/Ti	4	9.50	.58	6.08%
5 B151	B/Li	4	139.88	6.36	4.54%
5 B151	B/Ra	4	184.67	3.92	2.12%
5 B151	B/Gr	4	10.95	.19	1.75%
5 B151	B/Ga	4	82.50	4.36	5.28%
5 B151	B/Ti	4	31.40	1.74	5.53%
6 B161	B/Li	4	76.55	3.67	4.79%
6 B161	B/Ra	4	123.74	3.83	3.10%
6 B161	B/Gr	4	2.05	.30	14.63%
6 B161	B/Ga	4	39.92	2.86	7.17%
6 B161	B/Ti	4	9.25	.57	6.21%
7 B171	B/Li	4	275.10	3.92	1.43%
7 B171	B/Ra	4	210.21	2.88	1.37%
7 B171	B/Gr	4	13.03	.13	.97%
7 B171	B/Ga	4	162.94	5.43	3.33%
7 B171	B/Ti	4	55.20	.38	.69%
8 B181	B/Li	4	63.03	2.89	4.59%
8 B181	B/Ra	4	124.14	3.05	2.46%
8 B181	B/Gr	4	1.60	.18	11.55%
8 B181	B/Ga	4	47.70	4.43	9.28%
8 B181	B/Ti	4	10.02	.55	5.48%
9 B191	B/Li	4	207.56	3.90	1.88%
9 B191	B/Ra	4	147.22	1.98	1.34%
9 B191	B/Gr	4	7.35	.13	1.76%
9 B191	B/Ga	4	73.33	3.04	4.15%
9 B191	B/Ti	4	22.35	.94	4.21%
10 B1101	B/Li	4	178.96	5.49	3.07%
10 B1101	B/Ra	4	156.27	5.32	3.40%
10 B1101	B/Gr	4	3.00	.08	2.72%
10 B1101	B/Ga	4	51.25	.48	.95%
10 B1101	B/Ti	4	20.48	.92	4.50%

.../... suite du tableau 55

11	B1111	B/Li	4	1147.35	7.72	.67%
11	B1111	B/Ra	4	376.00	11.52	3.06%
11	B1111	B/Gr	4	71.67	2.11	2.94%
11	B1111	B/Ga	4	396.30	5.82	1.47%
11	B1111	B/Ti	4	266.12	2.25	.84%
12	B1121	B/Li	4	63.31	2.73	4.32%
12	B1121	B/Ra	4	112.03	1.76	1.57%
12	B1121	B/Gr	4	2.21	.19	8.73%
12	B1121	B/Ga	4	58.62	1.65	2.82%
12	B1121	B/Ti	4	17.08	1.00	5.88%
13	B1131	B/Li	4	248.11	3.76	1.52%
13	B1131	B/Ra	4	144.06	3.97	2.75%
13	B1131	B/Gr	4	4.63	.21	4.53%
13	B1131	B/Ga	4	62.72	2.45	3.91%
13	B1131	B/Ti	4	20.33	.71	3.48%
14	B1141	B/Li	4	230.06	2.20	.96%
14	B1141	B/Ra	4	135.25	1.75	1.30%
14	B1141	B/Gr	4	3.60	.29	8.18%
14	B1141	B/Ga	4	57.10	1.67	2.92%
14	B1141	B/Ti	4	15.74	.69	4.39%
15	B1151	B/Li	4	307.66	3.59	1.17%
15	B1151	B/Ra	4	212.51	3.56	1.68%
15	B1151	B/Gr	4	20.45	.91	4.47%
15	B1151	B/Ga	4	168.08	4.84	2.88%
15	B1151	B/Ti	4	193.38	5.54	2.87%
16	B1161	B/Li	4	311.65	6.83	2.19%
16	B1161	B/Ra	4	172.40	3.58	2.08%
16	B1161	B/Gr	4	17.06	.49	2.88%
16	B1161	B/Ga	4	139.64	1.84	1.32%
16	B1161	B/Ti	4	168.63	4.57	2.71%
17	B1171	B/Li	4	262.90	4.37	1.66%
17	B1171	B/Ra	4	170.16	2.69	1.58%
17	B1171	B/Gr	4	28.87	1.39	4.80%
17	B1171	B/Ga	4	100.24	2.45	2.45%
17	B1171	B/Ti	4	59.65	1.88	3.15%
18	B1181	B/Li	4	78.07	2.33	2.98%
18	B1181	B/Ra	4	143.24	2.42	1.69%
18	B1181	B/Gr	4	3.70	.18	4.93%
18	B1181	B/Ga	4	41.82	1.74	4.15%
18	B1181	B/Ti	4	16.18	.69	4.29%

B - sol rendzine sur calcaire.

1	B111	rB/Li	4	26.83	1.94	7.25%
1	B111	rB/Ra	4	46.60	2.02	4.34%
1	B111	rB/Gr	4	1.63	.10	5.89%
1	B111	rB/Ga	4	20.77	.63	3.04%
1	B111	rB/Ti	4	8.45	.43	5.11%
1	B111	rB/N	4	15.09	1.23	8.16%
2	B121	rB/Li	4	33.01	1.95	5.90%
2	B121	rB/Ra	4	44.38	1.33	2.99%
2	B121	rB/Gr	4	4.22	.25	5.87%
2	B121	rB/Ga	4	18.44	.77	4.18%
2	B121	rB/Ti	4	8.48	.36	4.22%
2	B121	rB/N	4	15.99	.91	5.72%

... suite du tableau 55.

3	B131	rB/Li	4	41.15	.68	1.64%
3	B131	rB/Ra	4	59.31	2.86	4.82%
3	B131	rB/Gr	4	4.11	.50	12.05%
3	B131	rB/Ga	4	20.80	.60	2.87%
3	B131	rB/Ti	4	10.56	.47	4.45%
3	B131	rB/N	4	16.22	.56	3.46%
4	B141	rB/Li	4	57.24	.75	1.31%
4	B141	rB/Ra	4	57.41	2.08	3.62%
4	B141	rB/Gr	4	3.20	.14	4.31%
4	B141	rB/Ga	4	25.65	1.07	4.17%
4	B141	rB/Ti	4	6.79	.61	9.05%
4	B141	rB/N	4	7.56	.17	2.31%
5	B151	rB/Li	4	75.84	2.61	3.44%
5	B151	rB/Ra	4	95.61	4.27	4.47%
5	B151	rB/Gr	4	6.23	.16	2.49%
5	B151	rB/Ga	4	41.03	.91	2.23%
5	B151	rB/Ti	4	12.06	.73	6.07%
5	B151	rB/N	4	22.28	.81	3.64%
6	B161	rB/Li	4	43.38	3.03	6.99%
6	B161	rB/Ra	4	50.26	2.51	4.99%
6	B161	rB/Gr	4	2.33	.10	4.28%
6	B161	rB/Ga	4	26.59	.68	2.55%
6	B161	rB/Ti	4	5.51	.19	3.39%
6	B161	rB/N	4	8.38	.31	3.70%
7	B171	rB/Li	4	252.27	4.49	1.78%
7	B171	rB/Ra	4	137.25	3.00	2.19%
7	B171	rB/Gr	4	25.39	.58	2.27%
7	B171	rB/Ga	4	61.71	2.08	3.38%
7	B171	rB/Ti	4	14.48	.48	3.31%
7	B171	rB/N	4	28.65	.33	1.16%
8	B181	rB/Li	4	47.04	2.31	4.90%
8	B181	rB/Ra	4	44.70	1.47	3.29%
8	B181	rB/Gr	4	2.36	.03	1.40%
8	B181	rB/Ga	4	17.98	.79	4.39%
8	B181	rB/Ti	4	7.60	.26	3.40%
8	B181	rB/N	4	7.63	.40	5.29%
9	B191	rB/Li	4	57.91	2.49	4.29%
9	B191	rB/Ra	4	83.09	3.39	4.08%
9	B191	rB/Gr	4	5.59	.06	.99%
9	B191	rB/Ga	4	42.97	1.22	2.84%
9	B191	rB/Ti	4	8.25	.34	4.14%
9	B191	rB/N	4	12.40	.48	3.84%
10	B1101	rB/Li	4	46.54	2.65	5.70%
10	B1101	rB/Ra	4	89.80	2.25	2.50%
10	B1101	rB/Gr	4	4.79	.13	2.62%
10	B1101	rB/Ga	4	26.44	.73	2.76%
10	B1101	rB/Ti	4	7.48	.35	4.68%
10	B1101	rB/N	4	10.05	.31	3.09%
11	B1111	rB/Li	4	827.59	20.39	2.46%
11	B1111	rB/Ra	4	208.85	2.50	1.20%
11	B1111	rB/Gr	4	60.54	1.59	2.63%
11	B1111	rB/Ga	4	134.11	6.96	5.19%
11	B1111	rB/Ti	4	24.12	5.95	24.66%
11	B1111	rB/N	4	46.57	.71	1.52%
12	B1121	rB/Li	4	47.37	1.02	2.15%
12	B1121	rB/Ra	4	47.58	3.72	7.81%
12	B1121	rB/Gr	4	2.40	.16	6.47%
12	B1121	rB/Ga	4	16.91	1.03	6.07%
12	B1121	rB/Ti	4	6.03	.17	2.83%
12	B1121	rB/N	4	9.43	.36	3.81%

... / ... suite du tableau 55

13	B1131	rB/Li	4	54.56	1.32	2.42%
13	B1131	rB/Ra	4	70.46	2.47	3.50%
13	B1131	rB/Gr	4	5.20	.08	1.53%
13	B1131	rB/Ga	4	35.48	1.13	3.19%
13	B1131	rB/Ti	4	9.78	.33	3.38%
13	B1131	rB/N	4	10.75	.34	3.14%
14	B1141	rB/Li	4	50.33	1.19	2.35%
14	B1141	rB/Ra	4	61.49	1.25	2.03%
14	B1141	rB/Gr	4	3.52	.11	3.06%
14	B1141	rB/Ga	4	31.63	1.63	5.14%
14	B1141	rB/Ti	4	8.48	.22	2.62%
14	B1141	rB/N	4	10.27	.34	3.33%
15	B1151	rB/Li	4	73.77	2.36	3.21%
15	B1151	rB/Ra	4	138.00	2.90	2.10%
15	B1151	rB/Gr	4	20.18	.34	1.67%
15	B1151	rB/Ga	4	90.49	2.09	2.31%
15	B1151	rB/Ti	4	17.98	.76	4.25%
15	B1151	rB/N	4	20.33	.36	1.76%
16	B1161	rB/Li	4	62.78	1.91	3.04%
16	B1161	rB/Ra	4	125.80	1.33	1.06%
16	B1161	rB/Gr	4	8.25	.33	4.02%
16	B1161	rB/Ga	4	73.46	2.21	3.01%
16	B1161	rB/Ti	4	14.95	.66	4.44%
16	B1161	rB/N	4	16.46	.25	1.49%
17	B1171	rB/Li	4	126.15	4.42	3.50%
17	B1171	rB/Ra	4	125.35	1.85	1.48%
17	B1171	rB/Gr	4	7.95	.21	2.62%
17	B1171	rB/Ga	4	67.61	2.02	2.99%
17	B1171	rB/Ti	4	21.40	.77	3.60%
17	B1171	rB/N	4	14.20	.37	2.63%
18	B1181	rB/Li	4	55.31	.74	1.33%
18	B1181	rB/Ra	4	82.09	2.01	2.44%
18	B1181	rB/Gr	4	3.09	.07	2.35%
18	B1181	rB/Ga	4	29.15	.84	2.87%
18	B1181	rB/Ti	4	6.47	.27	4.18%
18	B1181	rB/N	4	8.65	.21	2.41%

LEGENDE : * Modalité : Traitements
** Colonne : le sol sur lequel le blé est cultivé et l'organe.
r : sol de rendzine
B : sol sur limon
Gr : grains
Li : limbes
Ga : gaines
Ti : tiges

Moyenne : la moyenne de quatre répétitions est donnée en g/pot.
Les chiffres de modalité représentent les traitements du plan factoriel qui sont : 1 - Blanc. 2 - Fertilisalition complète (F.C.) 3 - Fertilisation complète sauf le bore et le manganèse (F.C.- B et Mn).4 - F.C.+ 3ppm de B et 6ppm de Mn. 5 - F.C.+ 3ppm de B. 6 - F.C. + 6ppm de Mn.7 - F.C.+ 5,5ppm de B. 8 - F.C.+ 11ppm de Mn. 9 - F.C.+ 5,5ppm de B et6ppm de Mn. 10 - F.C.+ 3ppm de B et 11ppm de Mn. 11 - F.C.+ 8ppm de B - 12. F.C.+16ppm de Mn. 13 - F.C.+ 5,5ppm de B et 11ppm de Mn. 14 - F.C. + 5,5ppm de B et 16ppm de Mn. - 15 - F.C. + 8ppm de B. 16 - F.C.+ 8ppm de B et 11ppm de Mn. 17 - F.C. + 8ppm de B et 16ppm de Mn. 18 - F.C. + 3ppm de B et 16 ppm de Mn.

... / ... Suite du tableau 55.

C - Sol peu évolué sur alluvion.

1*	A001**	B/Li	3	31.34	2.07	6.61%
1	A001	B/Ra	3	34.22	1.94	5.66%
1	A001	B/Gr	3	1.49	.07	4.70%
1	A001	B/Ga	3	14.01	.36	2.53%
1	A001	B/Ti	3	6.01	.21	3.52%
2	A.511	B/Li	3	38.37	1.15	2.99%
2	A.511	B/Ra	3	42.98	1.75	4.06%
2	A.511	B/Gr	3	3.43	.07	2.15%
2	A.511	B/Ga	3	17.60	.73	4.15%
2	A.511	B/Ti	3	8.57	.40	4.71%
3	A811	B/Li	3	398.09	13.97	3.51%
3	A811	B/Ra	3	134.92	4.99	3.70%
3	A811	B/Gr	3	35.10	1.08	3.06%
3	A811	B/Ga	3	102.77	3.24	3.15%
3	A811	B/Ti	3	36.21	1.60	4.41%
4	A.5161	B/Li	3	31.10	1.43	4.60%
4	A.5161	B/Ra	3	35.09	1.05	3.00%
4	A.5161	B/Gr	3	2.69	.19	6.89%
4	A.5161	B/Ga	3	15.14	.55	3.62%
4	A.5161	B/Ti	3	6.51	.30	4.67%
5	A8161	B/Li	3	137.62	5.26	3.82%
5	A8161	B/Ra	3	79.81	2.80	3.50%
5	A8161	B/Gr	3	8.16	.32	3.88%
5	A8161	B/Ga	3	41.75	1.17	2.79%
5	A8161	B/Ti	3	11.85	.55	4.61%

* Les chiffres dans cette colonne représentent les numéros des traitements.

** Le premier chiffre donne la dose de bore apporté (µg /g) et le deuxième donne la dose de manganèse apporté (µg/g).

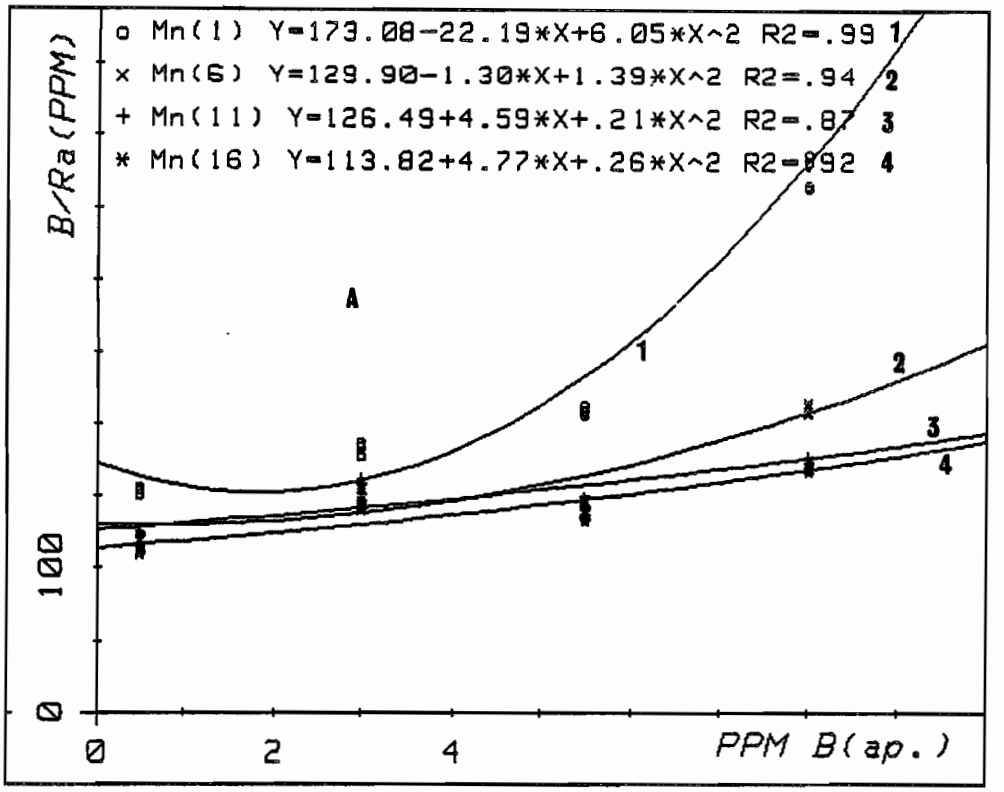
de bore que les organes de blé cultivé sur les autres sols (voir tableau 55). Nous avons trouvé aussi que les racines absorbent le moins de bore dans le cas du sol sur alluvion. Elles accumulent plus de bore au stade début de tallage et au stade floraison par rapport au stade maturation ; donc, sa migration est plus faible pour les deux premiers stades. L'application en excès du manganèse diminue l'absorption et l'accumulation du bore par les racines et sa migration à travers elles. Cette décroissance est de 20,5 % pour une fertilisation avec 6 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse (modalité 6, tableau 55), par rapport à la fertilisation complète (FC) (modalité 3, tableau 55), dans le cas du sol sur limon. Elle est de 15,3 % dans le cas du sol de rendzine. Lors d'application de 16 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse, la décroissance des teneurs en bore des racines est de 29,8 % pour le sol sur limon, de 19,8 % pour le sol de rendzine et de 18,4 % pour le sol sur alluvion.

L'accroissement des concentrations des racines en bore n'est pas proportionnel à l'augmentation des doses appliquées ; l'analyse de variance confirme ce résultat car aucune valeur des F n'est significative, excepté l'effet du bore dans le cas du sol de rendzine. (tabl.56)

Tableau 56 : Analyse de variance de l'influence de l'application du bore et du manganèse sur la teneur en bore des racines dans les trois sols étudiés.

Sol	Elément ajouté	$F_{pratique}$	$F_{théorique}$
Sol sur limon	B	5,35	6,99
	Mn	4,77	6,99
	Interaction (Mn+B)	324,36 *	2,80
Sol de rendzine	B	8,16 *	6,99
	Mn	5,11	6,99
	Interaction (Mn+B)	220,38 *	2,80
Sol sur alluvion	B	8,38	4052
	Mn	1,78	4052
	Interaction (Mn+B)	181,56 *	11,26

* F (fonction discriminant de test de Snedecor) significatif au niveau de probabilité 0,99. Les valeurs des $F_{pratique}$ sont significa-



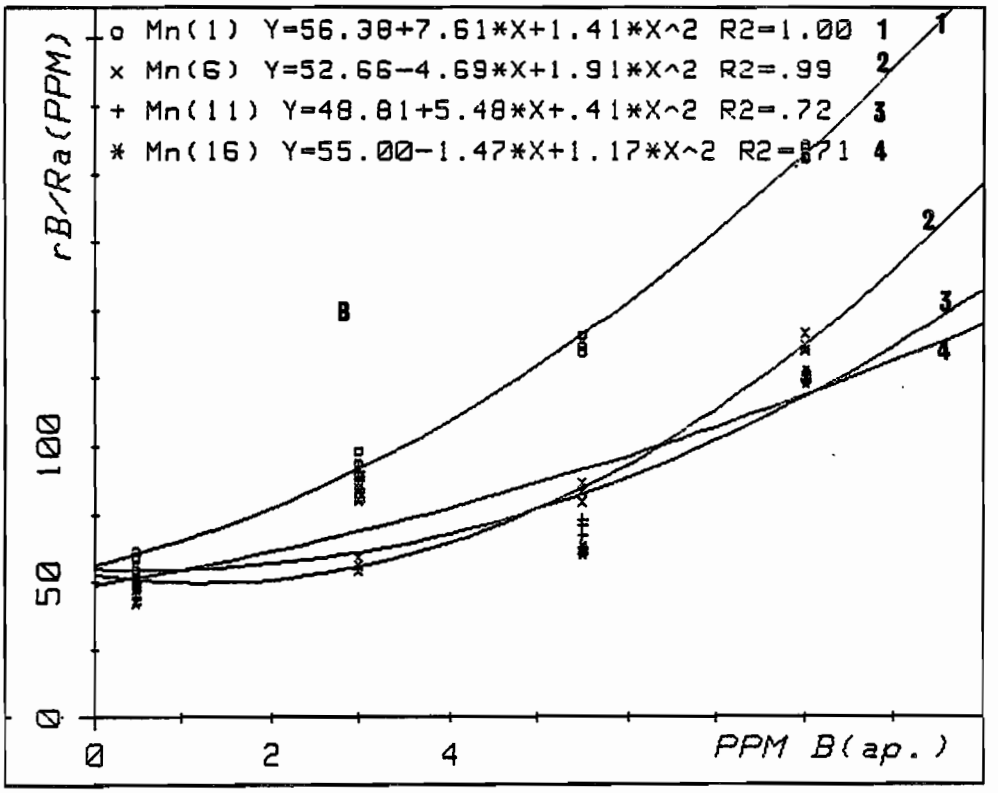


Figure 66 - Relation (au moyen de l'analyse de régression) entre la teneur en bore des racines du blé cultivé ;

A - sur sol brun lessivé sur limon.

B - sur sol rendzine sur calcaire (r), et la fertilisation en bore et en manganèse.

tives lorsqu'elles sont supérieures à celles des $F_{théorique}$ données par les tables de F. Dans l'ensemble de ce chapitre, les valeurs $F_{théorique}$ sont les mêmes indiquées dans ce tableau. Les valeurs des $F_{théorique}$, pour l'expérience sur le sol sur alluvion, sont plus grandes car le nombre de traitements (et par conséquent, le nombre de degré de liberté) est moins important.

Par contre, l'effet de l'application simultanée du bore et du manganèse (interaction Mn+B) est significatif. En outre, nous avons trouvé une corrélation positive et significative au niveau 0,99, entre le bore apporté et la teneur de bore dans les racines (r = 0,804), tandis que le manganèse apporté ne corrèle pas avec la teneur de bore des racines (r = 0,21). Dans le cas du sol sur alluvion, ces corrélations sont respectivement r = 0,888 et r = 0,143 et dans le cas du sol sur limon, elles sont respectivement de r = 0,747 et r = 0,366.

Les courbes de régression (fig. 66) reflètent la liaison entre la fertilisation et l'accumulation du bore dans les racines ; nous pouvons constater que cette liaison est un peu plus nette dans le cas du sol de rendzine et qu'elle est plus accentuée lorsque l'application du manganèse est constante à 1 $\mu g.g^{-1}$, tandis que lorsque le manganèse est appliqué en plus fortes doses l'influence entre la dose du bore appliquée et la teneur des racines s'infléchie surtout dans le cas du sol sur limon.

1.1.2. Le bore dans les tiges.

Les résultats du tableau 55 montrent que les tiges n'accumulent pas une quantité importante du bore par rapport aux autres organes, sauf les grains ; donc, le bore transite dans les tiges avec la sève ascendante pour migrer des racines vers les autres organes et n'y est fixé qu'en faible partie. La teneur de 13,4 $\mu g.g^{-1}$ du bore dans la matière sèche des tiges dans le cas de FC serait la teneur correspondant à la production optimale de matière sèche, tandis qu'une teneur de 31,4 $\mu g.g^{-1}$ est accompagné d'une réduction de rendement.

L'enrichissement en bore des tiges n'est pas proportionnel à l'augmentation des doses appliquées du bore mais est plus important que dans le cas des racines ; lorsqu'une quantité 16 fois plus

forte que la fertilisation complète (FC) est ajoutée (8 $g.g^{-1}$), le bore augmente de 8,5 fois dans le cas du blé cultivé sur sol sur limon. L'analyse de variance montre un effet significatif de l'application du bore sur sa teneur dans les tiges dans le cas des trois sols (tableau 57).

Tableau 57 : Relation entre application du bore et du manganèse et la teneur en bore dans les tiges.

Sol	Elément ajouté	F (test de Snedecor
Sol sur limon	B	14,05 *
	Mn	1,68
	Interaction (Mn+B)	1538,68 *
Sol de rendzine	B	46,23 *
	Mn	10,29 *
	Interaction (Mn+B)	4,49 *
Sol sur alluvion	B	2,19
	Mn	1,41
	Interaction (Mn+B)	480,45 *

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Nous avons trouvé aussi que l'application du manganèse décroît la concentration du bore dans les tiges ; cet effet n'est mis en évidence que dans le cas du sol de rendzine (tableau 57). Dans ce même tableau, on constate que la combinaison entre les deux éléments affecte significativement la teneur en bore des tiges dans le cas des trois sols. Des corrélations significatives sont trouvées entre le bore apporté et sa concentration dans les tiges (tableau 58), tandis qu'il n'y a pas de corrélation dans le cas d'apport du manganèse.

Tableau 58 : Corrélation entre bore et manganèse apporté et concentration du bore dans les tiges.

Sol	Coefficient de corrélation (r)	
	Mn apporté	B apporté
Sol sur limon	- 0,20	0,72 *
Sol de rendzine	- 0,09	0,90 *
Sol sur alluvion	- 0,31	0,73 *

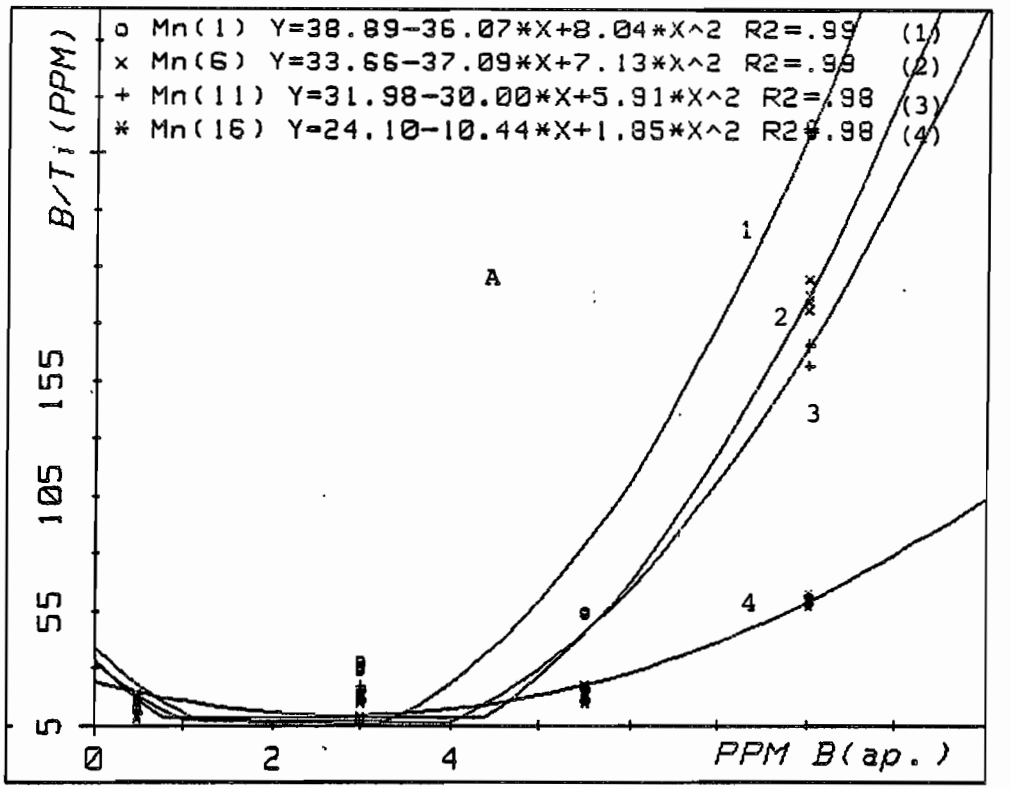
* Significatif au niveau de probabilité 0,99. Les coefficients de corrélation sont significatifs lorsqu'ils sont > 0,302 pour le sol sur limon et le sol de rendzine et supérieurs à 0,641 pour le sol sur alluvion car le nombre des traitements (et donc le nombre de degré de liberté) est moins important.

Les courbes de régression (fig. 67 A et B) représentent la liaison significative entre le bore appliqué et sa concentration dans les tiges ; ces courbes ont aussi le mérite de montrer que lors d'une application d'un excès du manganèse la concentration en bore dans les tiges baisse.

1.1.3. Le bore dans les gaines.

Le tableau 55 nous montre que les gaines sont moyennement riches en bore par rapport aux autres organes ; elles sont plus riches que les grains et les tiges et moins riches que les racines et les limbes. Elles sont plus riches dans le cas du blé cultivé sur limon : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion (tableau 55).

L'évolution de la concentration des gaines en bore est comme suit pour les trois sols : stade maturation > stade début de tallage > stade de floraison (respectivement pour le sol sur limon 52,4 $\mu g.g^{-1}$ > 44,1 > 35,4 et 17,8 > 14,2 > 12,6 pour le sol de rendzine). Le tableau 55 montre un taux d'augmentation des teneurs des gaines en bore plus important avec l'application de la dose 8 $\mu g.g^{-1}$ du



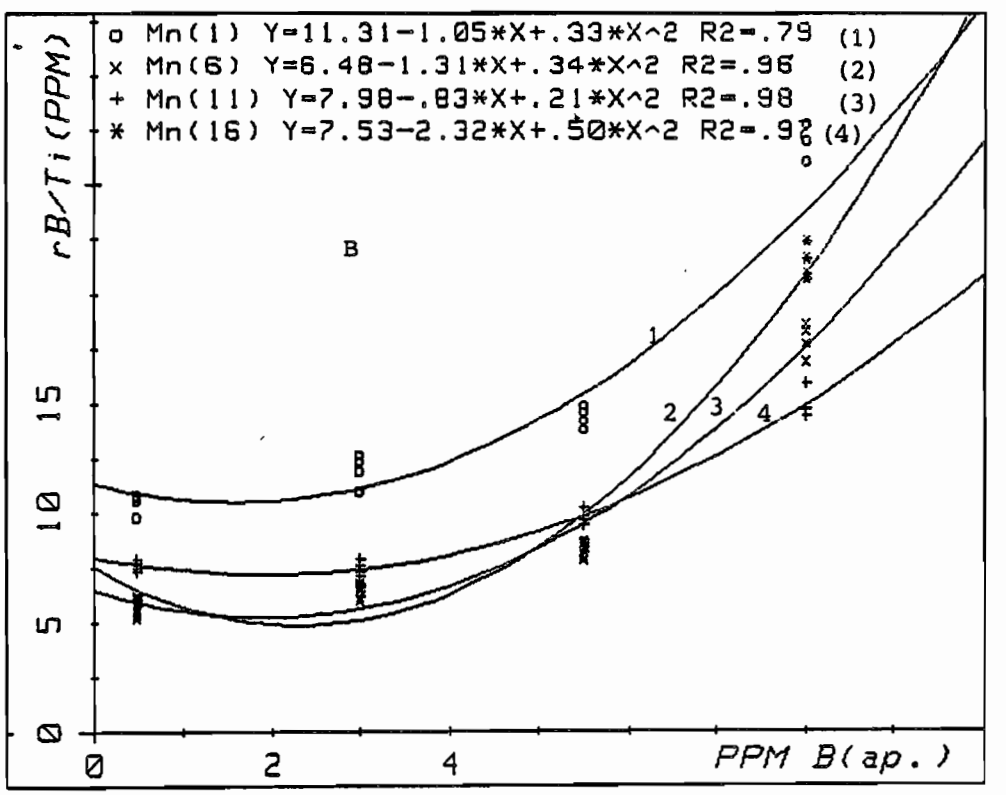


Figure 67 - Relation entre l'accumulation du bore dans les tiges et la fertilisation en bore et en manganèse.

A - sol brun lessivé sur limon

B - sol rendzine sur calcaire (r).

bore que le taux avec l'application de la dose 5,5 $\mu g.g^{-1}$.

L'analyse de variance indique une influence significative de la fertilisation en bore et en manganèse simultanément ou en bore uniquement sur les concentrations du bore dans les gaines excepté pour le sol sur alluvion (tableau 59). Ce même tableau montre que l'influence de la fertilisation en manganèse n'est pas signigicative dans les trois sols. Les coefficients de corrélation confirment cela (tableau 60).

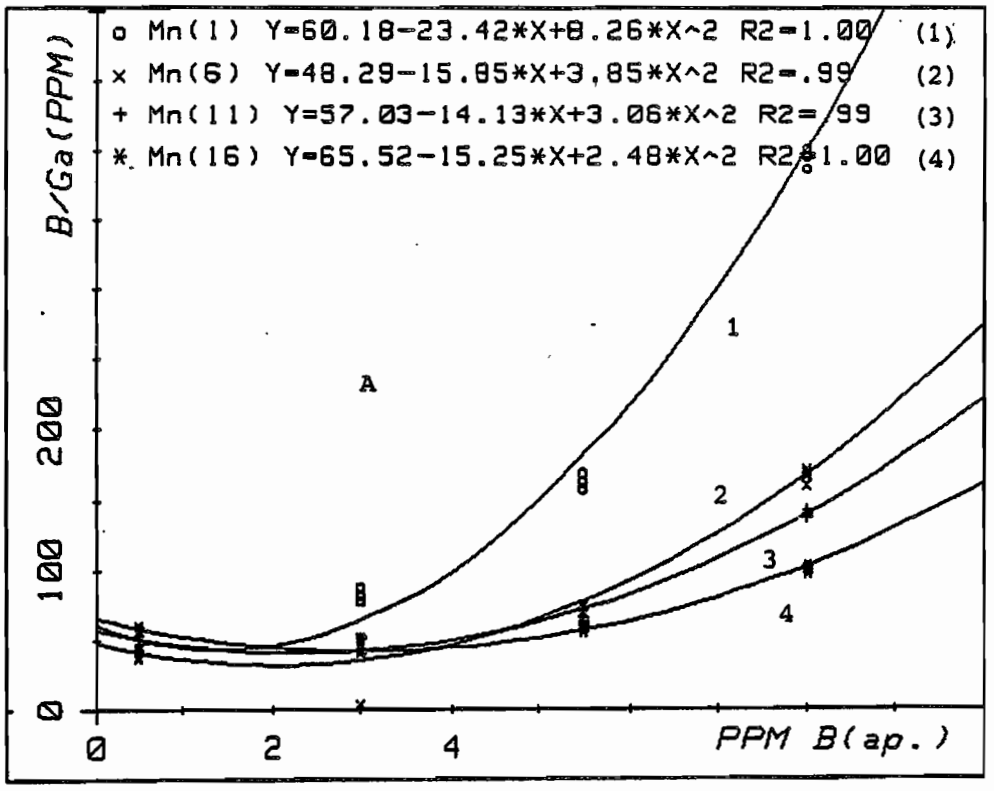
Tableau 59 : Analyse de variance de l'influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur l'accumulation du bore dans les gaines.

Sol	Elément ajouté	F
Sol sur limon	B	5,61 *
	Mn	2,72
	Mn+B	326,62 *
Sol de rendzine	B	23,75 *
	Mn	3,94
	Mn+B	137,59 *
Sol sur alluvion	B	3,64
	Mn	1,18
	Mn+B	811,85 *

Tableau 60 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration en bore dans les gaines.

Sol	Coefficient de corrélation (r)	
	Mn apporté	B apporté
Sol sur limon	- 0,21	0,71 *
Sol de rendzine	- 0,14	0,83 *
Sol sur alluvion	- 0,21	0,82 *

* r : significatif au niveau de probabilité 0,99.



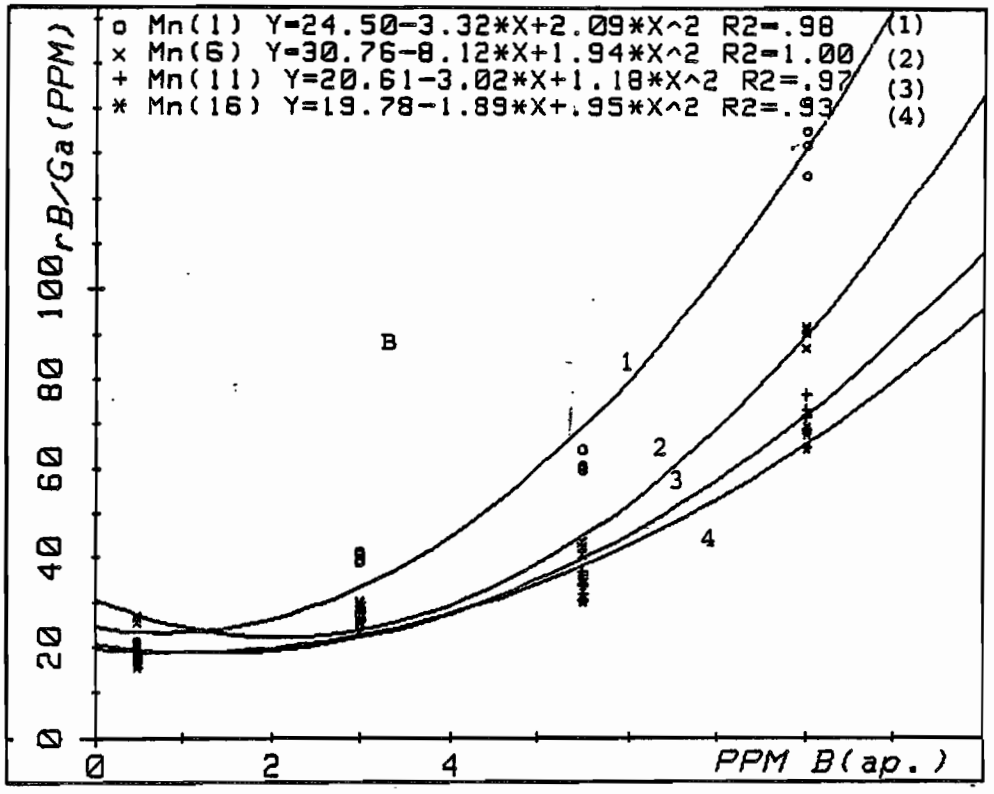


Figure 68 - Analyse de régression de la relation entre l'accumulation du bore dans les gaines et la fertilisation en bore et en manganèse.

A - sol brun lessivé sur limon.

B - sol rendzine sur calcaire (r).

Les courbes de régression (fig. 68 A et B) dégagent une liaison significative entre la fertilisation en bore et son accumulation dans les gaines. Cette liaison reste significative malgré l'interaction du manganèse qui l'affecte par rapport au cas de fertilisation optimale en manganèse (1 $\mu g.g^{-1}$).

1.1.4. Le bore dans les limbes.

Les limbes sont les plus riches en bore après les racines mais à partir d'un apport de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ de bore,ils deviennent même plus riches que ces dernières, ce qui indiquerait une migration plus intense des racines vers les limbes (tableau 55). L'évolution de la concentration en fonction du stade du développement (2ème expérience) est décroissante dans l'ordre : stade début de tallage > stade floraison > stade maturation (respectivement en cas de fertilisation complète (FC) pour le sol sur limon : 134,4 > 83,7 > 79,4) ; ce phénomène est observé pour tous les traitements. Les limbes, comme les autres organes, accumulent plus de bore dans le cas du sol sur limon que dans le cas du sol de rendzine et encore plus que dans le cas du sol sur alluvion.

On constate que les coefficients de corrélation de la fertilisation en bore sont significatif dans les trois sols mais l'analyse de variance ne met pas en évidence cet effet. Par contre, il est hautement significatif lorsque les deux éléments sont appliqués simultanément (tableau 61).

Les courbes de régression (fig. 69 A et B), ainsi que les équations, montrent clairement l'effet d'une fertilisation excessive en manganèse sur la décroissance de l'accumulation du bore dans les limbes. Dans la droite de régression (fig. 69 C), nous donnons un exemple de l'effet de manganèse sur la baisse de teneur en bore des limbes pour le sol sur alluvion. Nous avons trouvé une corrélation significative (au niveau 0,99) entre la concentration du bore dans les limbes et celle dans les autres organes aussi bien dans le même sol qu'entre les organes des différents sols.

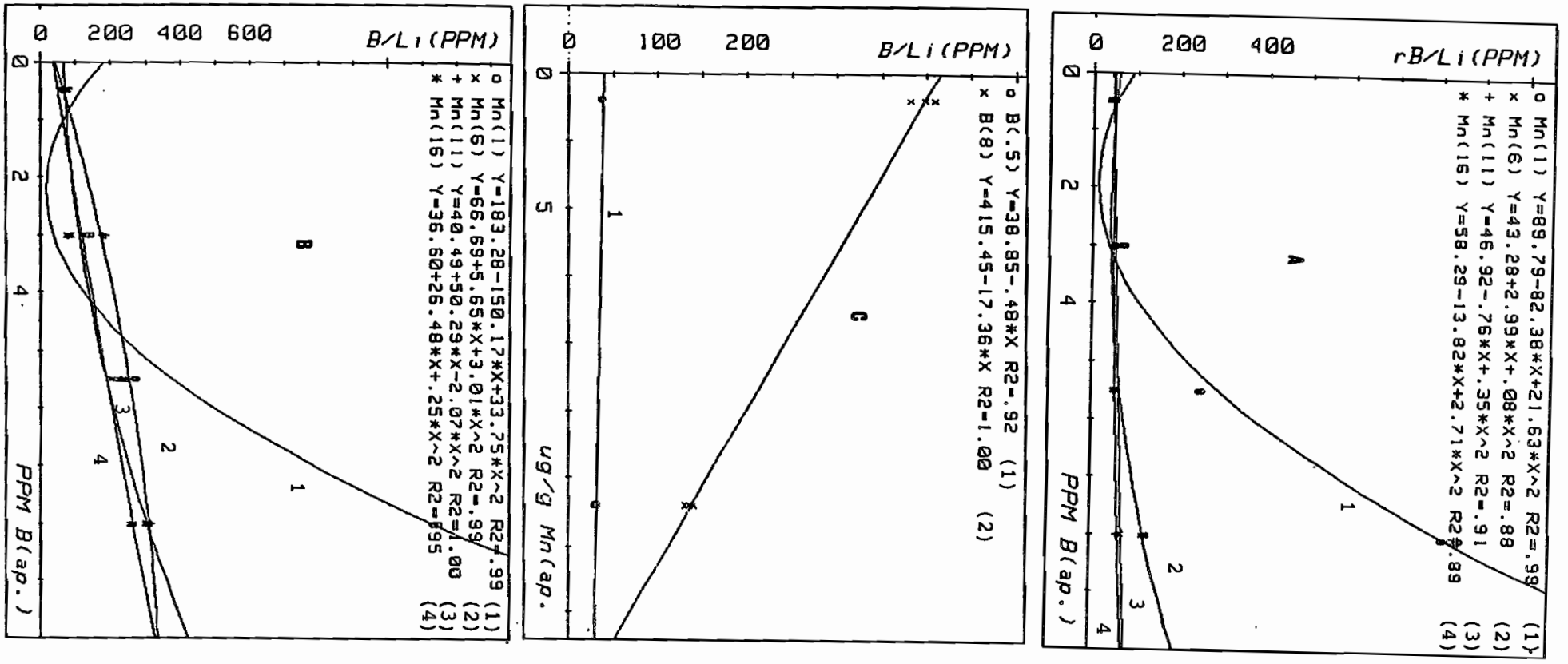


Figure 69 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du bore dans les limbes.
A - sol brun lessivé sur limon. B - sol rendzine sur calcaire (r) C - sol sur alluvion.

Tableau 61 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur l'accumulation du bore dans les limbes.

Sol	Elément apporté	F (test de Snedecor)	Coefficient de corrélation (r)
Sol sur limon	B	3,52	0,77 *
	Mn	1,30	-0,20
	Mn+B	929,34 *	-
Sol de rendzine	B	1,90	0,70 *
	Mn	1,46	-0,26
	Mn+B	817,25 *	-
Sol sur alluvion	B	3,39	0,81 *
	Mn	1,12	-0,22
	Mn+B	850,52 *	-

* F et r significatifs au niveau de 0,99.

1.1.5. Le bore dans les grains.

Le tableau 55 montre que les grains sont très nettement les organes les plus pauvres en bore et ceci dans les trois sols. Les épis au stade floraison sont beaucoup plus riche en bore qu'au stade maturation ; ceci permet d'énoncer deux hypothèses qui pourraient expliquer ce résultat : la première concerne une éventuelle migration secondaire du bore au-delà du stade floraison et la deuxième l'augmentation plus rapide de l'accumulation de matière sèche des grains que celle du bore qui pourrait migrer plus faiblement vers les grains au-delà du stade floraison. Il n'est pas exclu que les deux hypothèses aient lieu. L'analyse de variance ne décèle une influence significative de la fertilisation en bore sur sa concentration dans les grains que dans le cas de culture sur sol sur limon ; elle ne décèle pas non plus d'influence significative de la fertilisation en manganèse : par contre, elle décèle une influence systématique de l'interaction des deux éléments (tableau 62).

Une corrélation significative existe au niveau 0,99, entre la ferti-

Tableau 62 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur l'accumulation du bore dans les grains.

Sol	Elément ajouté	F	Coefficient de corrélation (r)
Sol sur limon	B	7,04 *	0,84 *
	Mn	2,33	-0,14
	Mn+B	1003,85 *	-
Sol de rendzine	B	7,99 *	0,67 *
	Mn	2,70	-0,32
	Mn+B	2336,91 *	-
Sol sur alluvion	B	2,01	0,74 *
	Mn	1,12	-0,28
	Mn+B	1588,08 *	-

* F et r significatifs au niveau de probabilité 0,99.

lisation en bore et son accumulation dans les grains, tandis qu'une corrélation négative non significative existe dans le cas de fertilisation en manganèse (tableau 62). Ce résultat ressort mieux de l'analyse de régression (fig. 70 A, B et C). Celle-ci montre une relation significative ($R^2 > 0,90$) entre la fertilisation en bore, en particulier lorsque le manganèse est appliqué en dose optimale (1 $\mu g.g^{-1}$). Les courbes de régression montrent aussi la décroissance de la concentration du bore dans les grains quand le manganèse est appliqué en excès. Cet effet est réduit en présence de la dose 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore (pente des courbes en général plus importante).

Nous avons trouvé une corrélation significative entre le bore dans les grains et le bore dans les autres organes.

A titre d'essai nous avons dosé le bore dans les noeuds de blé cultivé sur sol de rendzine ; ce dosage a montré (tableau 55) que les noeuds contiennent plus de bore que les grains et les tiges et moins que les limbes, les gaines et les racines. Le taux de l'enrichis-

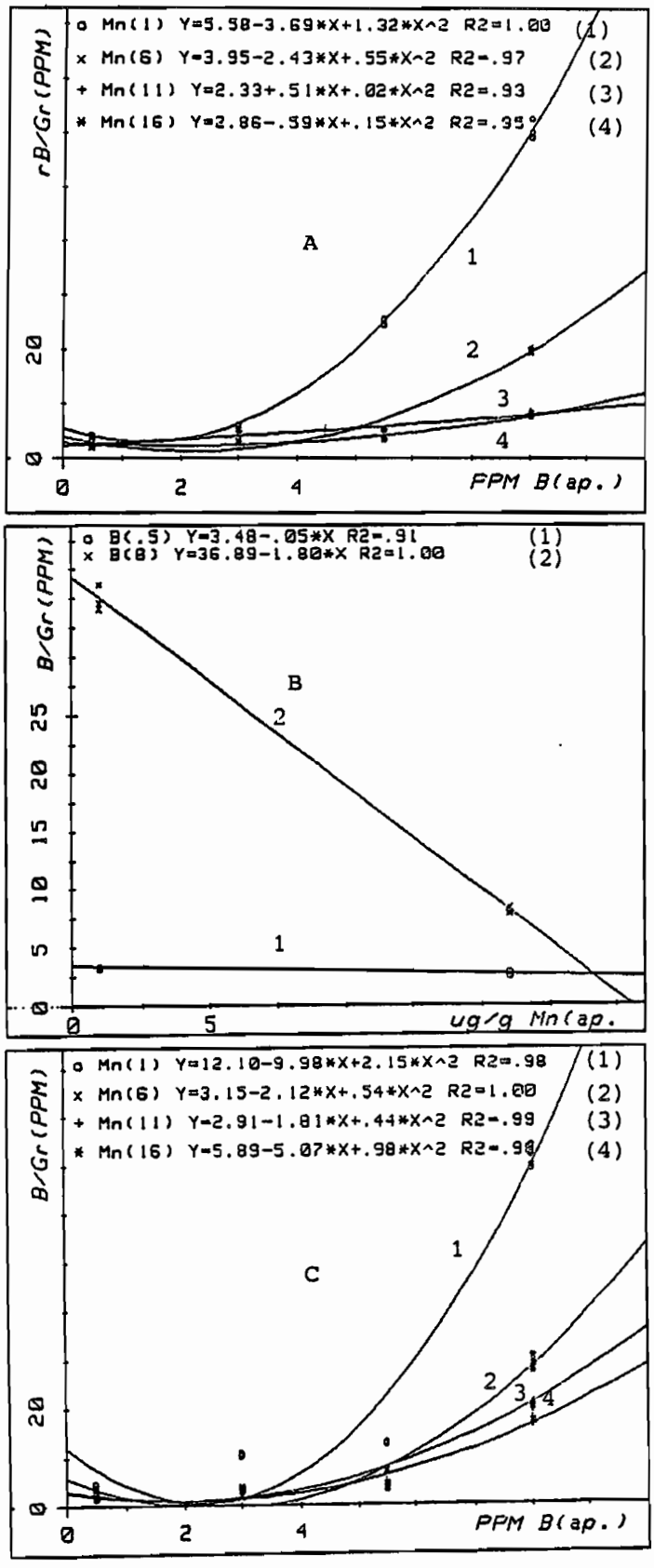


Figure 70 - Relation (au moyen de l'analyse de régression) entre la teneur en bore des grains du blé cultivé :

A - sur sol de rendzine (r)

B - sur sol sur alluvion et en manganèse.

C - sur sol sur limon et fertilisation en bore

sement des noeuds en bore, en fonction de la fertilisation, est moins important que les autres organes. Nous pouvons conclure que la concentration du bore dans les différents organes est pour une fertilisation complète selon l'ordre décroissant suivant : racine > limbe > gaines > noeuds > tiges > grains.

VIII.1.2. Manganèse.

1.2.1. Prélèvement, migration et accumulation du manganèse dans les racines.

Les racines accumulent moins de manganèse par rapport aux limbes et aux gaines (tableau 63), ce qui montre que le manganèse prélevé par les racines migre fortement vers les parties aériennes. Il est ainsi plus mobile que le bore. Cette migration est moins forte pendant le stade floraison et encore moins au stade début de tallage : en conséquence, les racines accumulent plus de manganèse pendant ces deux stades.

L'accumulation du manganèse augmente faiblement en fonction de la dose de fertilisation en manganèse. L'analyse de variance ne montre, en aucun cas, une influence significative de la dose sur l'accumulation ; il en est de même pour la fertilisation en bore. Par contre, l'interaction entre manganèse apporté et bore apporté a une influence significative dans tous les sols et se manifeste par une baisse de l'accumulation du manganèse dans les racines (tableau 64).

Une corrélation significative existe pour les trois sols entre la fertilisation en manganèse et sa teneur dans les racines (tableau 65). La décroissance de la concentration des racines en manganèse n'est pas corrélée avec l'ajout du bore en excès (tableau 65). Une liaison entre la fertilisation en manganèse et sa concentration dans les racines est montrée par l'analyse de régression (fig. 71 A et B). Ces courbes montrent aussi que le bore, lorsqu'il est apporté en excès, fait baisser la concentration du manganèse dans les racines.

Figure 63 - Moyennes ($\mu g.g^{-1}$ de matières sèches), écarts-types et coefficients de corrélation (C.V.%) des variations des teneurs en manganèse dans les différents organes en fonction des doses appliquées en bore et en manganèse.

A - Sol brun lessivé sur limon.

----------Fichier FOUAD1----------

Modalité		Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1*	B111**	Mn/Li	4	254.78	5.11	2.01%
1	B111	Mn/Ra	4	106.47	2.68	2.52%
1	B111	Mn/Gr	4	68.15	1.91	2.81%
1	B111	Mn/Ga	4	182.91	7.50	4.10%
1	B111	Mn/Ti	4	14.81	.73	4.91%
2	B121	Mn/Li	4	264.98	7.28	2.75%
2	B121	Mn/Ra	4	108.37	2.29	2.12%
2	B121	Mn/Gr	4	72.86	2.40	3.30%
2	B121	Mn/Ga	4	203.16	2.89	1.42%
2	B121	Mn/Ti	4	14.99	.66	4.38%
3	B131	Mn/Li	4	317.20	4.83	1.52%
3	B131	Mn/Ra	4	127.86	4.41	3.45%
3	B131	Mn/Gr	4	76.06	2.00	2.62%
3	B131	Mn/Ga	4	212.39	3.26	1.53%
3	B131	Mn/Ti	4	17.95	.48	2.69%
4	B141	Mn/Li	4	405.90	10.46	2.58%
4	B141	Mn/Ra	4	114.98	3.51	3.05%
4	B141	Mn/Gr	4	72.11	1.59	2.20%
4	B141	Mn/Ga	4	230.83	6.60	2.86%
4	B141	Mn/Ti	4	23.08	.82	3.57%
5	B151	Mn/Li	4	380.18	8.21	2.16%
5	B151	Mn/Ra	4	122.27	2.19	1.79%
5	B151	Mn/Gr	4	64.84	1.43	2.21%
5	B151	Mn/Ga	4	216.12	4.88	2.26%
5	B151	Mn/Ti	4	15.26	.42	2.76%
6	B161	Mn/Li	4	398.40	14.51	3.64%
6	B161	Mn/Ra	4	145.78	5.21	3.58%
6	B161	Mn/Gr	4	86.41	1.22	1.42%
6	B161	Mn/Ga	4	238.32	3.73	1.57%
6	B161	Mn/Ti	4	28.83	.88	3.06%
7	B171	Mn/Li	4	234.88	5.55	2.36%
7	B171	Mn/Ra	4	113.37	6.24	5.50%
7	B171	Mn/Gr	4	64.47	.72	1.11%
7	B171	Mn/Ga	4	212.06	3.98	1.88%
7	B171	Mn/Ti	4	16.55	.54	3.26%
8	B181	Mn/Li	4	484.36	10.53	2.17%
8	B181	Mn/Ra	4	148.61	10.03	6.75%
8	B181	Mn/Gr	4	94.95	1.71	1.80%
8	B181	Mn/Ga	4	277.88	4.90	1.76%
8	B181	Mn/Ti	4	38.14	1.01	2.65%
9	B191	Mn/Li	4	337.01	4.69	1.39%
9	B191	Mn/Ra	4	109.56	3.31	3.02%
9	B191	Mn/Gr	4	66.18	.91	1.37%
9	B191	Mn/Ga	4	217.82	2.99	1.37%
9	B191	Mn/Ti	4	21.81	1.14	5.24%

.../... suite du tableau 63

10	B1101	Mn/Li	4	422.57	11.40	2.70%
10	B1101	Mn/Ra	4	143.15	4.20	2.94%
10	B1101	Mn/Gr	4	78.89	.75	.95%
10	B1101	Mn/Ga	4	237.83	5.26	2.21%
10	B1101	Mn/Ti	4	33.16	1.10	3.32%
11	B1111	Mn/Li	4	206.93	7.37	3.56%
11	B1111	Mn/Ra	4	121.87	.96	.79%
11	B1111	Mn/Gr	4	66.43	1.42	2.14%
11	B1111	Mn/Ga	4	185.02	8.48	4.58%
11	B1111	Mn/Ti	4	15.87	.68	4.31%
12	B1121	Mn/Li	4	602.55	12.99	2.16%
12	B1121	Mn/Ra	4	199.39	5.77	2.89%
12	B1121	Mn/Gr	4	137.53	3.57	2.60%
12	B1121	Mn/Ga	4	306.24	5.49	1.79%
12	B1121	Mn/Ti	4	52.11	1.11	2.13%
13	B1131	Mn/Li	4	408.57	4.84	1.18%
13	B1131	Mn/Ra	4	142.57	4.46	3.13%
13	B1131	Mn/Gr	4	72.20	1.96	2.71%
13	B1131	Mn/Ga	4	247.71	3.26	1.32%
13	B1131	Mn/Ti	4	26.00	1.18	4.52%
14	B1141	Mn/Li	4	389.72	5.62	1.44%
14	B1141	Mn/Ra	4	151.13	3.54	2.35%
14	B1141	Mn/Gr	4	82.09	3.12	3.80%
14	B1141	Mn/Ga	4	324.75	5.97	1.84%
14	B1141	Mn/Ti	4	32.36	1.71	5.30%
15	B1151	Mn/Li	4	358.47	3.99	1.11%
15	B1151	Mn/Ra	4	106.02	2.88	2.72%
15	B1151	Mn/Gr	4	64.29	2.20	3.42%
15	B1151	Mn/Ga	4	238.54	3.22	1.35%
15	B1151	Mn/Ti	4	15.68	.55	3.52%
16	B1161	Mn/Li	4	402.17	7.05	1.75%
16	B1161	Mn/Ra	4	135.29	1.94	1.43%
16	B1161	Mn/Gr	4	70.17	.42	.59%
16	B1161	Mn/Ga	4	264.16	4.33	1.64%
16	B1161	Mn/Ti	4	21.31	.58	2.70%
17	B1171	Mn/Li	4	408.70	6.03	1.47%
17	B1171	Mn/Ra	4	150.00	1.99	1.33%
17	B1171	Mn/Gr	4	98.42	1.66	1.69%
17	B1171	Mn/Ga	4	305.41	7.28	2.38%
17	B1171	Mn/Ti	4	37.15	1.26	3.38%
18	B1181	Mn/Li	4	438.86	3.36	.76%
18	B1181	Mn/Ra	4	165.14	4.11	2.49%
18	B1181	Mn/Gr	4	101.69	2.52	2.48%
18	B1181	Mn/Ga	4	313.92	3.38	1.08%
18	B1181	Mn/Ti	4	42.04	1.57	3.74%

B - Sol rendzine sur calcaire.

1	B111	rMn/Li	4	176.523	2.675	1.515%
1	B111	rMn/Ra	4	63.50	2.42	3.82%
1	B111	rMn/Gr	4	21.54	1.40	6.51%
1	B111	rMn/Ga	4	35.70	1.62	4.54%
1	B111	rMn/Ti	4	8.36	.39	4.71%
1	B111	rMn/N	4	12.14	.32	2.60%
2	B121	rMn/Li	4	184.413	4.825	2.616%
2	B121	rMn/Ra	4	61.94	2.49	4.02%
2	B121	rMn/Gr	4	21.17	1.05	4.97%
2	B121	rMn/Ga	4	36.73	2.50	6.80%
2	B121	rMn/Ti	4	8.34	.36	4.31%
2	B121	rMn/N	4	11.81	.73	6.16%

Suite du tableau 63

3	B131	rMn/Li	4	204.625	2.462	1.203%
3	B131	rMn/Ra	4	70.02	.88	1.25%
3	B131	rMn/Gr	4	24.91	1.07	4.28%
3	B131	rMn/Ga	4	42.93	2.41	5.61%
3	B131	rMn/Ti	4	11.14	.35	3.18%
3	B131	rMn/N	4	12.69	.59	4.67%
4	B141	rMn/Li	4	230.963	6.368	2.757%
4	B141	rMn/Ra	4	75.64	1.43	1.89%
4	B141	rMn/Gr	4	28.19	.78	2.77%
4	B141	rMn/Ga	4	55.64	2.54	4.56%
4	B141	rMn/Ti	4	9.75	.55	5.61%
4	B141	rMn/N	4	13.12	1.36	10.34%
5	B151	rMn/Li	4	151.633	2.286	1.507%
5	B151	rMn/Ra	4	59.84	1.21	2.02%
5	B151	rMn/Gr	4	26.44	.46	1.73%
5	B151	rMn/Ga	4	47.38	2.22	4.68%
5	B151	rMn/Ti	4	7.48	.40	5.35%
5	B151	rMn/N	4	11.18	.56	4.97%
6	B161	rMn/Li	4	294.975	5.548	1.881%
6	B161	rMn/Ra	4	84.38	1.64	1.94%
6	B161	rMn/Gr	4	40.63	1.37	3.37%
6	B161	rMn/Ga	4	72.25	2.08	2.88%
6	B161	rMn/Ti	4	10.11	.81	8.06%
6	B161	rMn/N	4	16.77	.40	2.39%
7	B171	rMn/Li	4	144.393	4.226	2.927%
7	B171	rMn/Ra	4	43.78	1.07	2.44%
7	B171	rMn/Gr	4	23.15	1.17	5.07%
7	B171	rMn/Ga	4	57.35	2.66	4.64%
7	B171	rMn/Ti	4	6.89	.59	8.55%
7	B171	rMn/N	4	7.15	.85	11.94%
8	B181	rMn/Li	4	315.125	2.198	.697%
8	B181	rMn/Ra	4	148.85	4.81	3.23%
8	B181	rMn/Gr	4	45.18	1.23	2.71%
8	B181	rMn/Ga	4	114.53	1.60	1.39%
8	B181	rMn/Ti	4	9.39	.47	4.97%
8	B181	rMn/N	4	19.02	.64	3.36%
9	B191	rMn/Li	4	163.430	4.383	2.682%
9	B191	rMn/Ra	4	81.41	.54	.66%
9	B191	rMn/Gr	4	30.25	1.53	5.07%
9	B191	rMn/Ga	4	87.83	2.68	3.05%
9	B191	rMn/Ti	4	6.75	.38	5.66%
9	B191	rMn/N	4	10.99	.76	6.90%
10	B1101	rMn/Li	4	185.593	2.599	1.401%
10	B1101	rMn/Ra	4	95.43	3.44	3.61%
10	B1101	rMn/Gr	4	34.48	.93	2.70%
10	B1101	rMn/Ga	4	106.08	2.92	2.75%
10	B1101	rMn/Ti	4	12.97	.49	3.81%
10	B1101	rMn/N	4	12.16	.65	5.39%
11	B1111	rMn/N	4	9.94	.37	3.74%
11	B1111	rMn/Li	4	144.305	2.481	1.719%
11	B1111	rMn/Ra	4	26.05	1.30	4.97%
11	B1111	rMn/Gr	4	29.49	.57	1.93%
11	B1111	rMn/Ga	4	42.63	2.00	4.70%
11	B1111	rMn/Ti	4	9.09	.30	3.28%
12	B1121	rMn/Li	4	341.710	8.549	2.502%
12	B1121	rMn/Ra	4	245.80	5.35	2.18%
12	B1121	rMn/Gr	4	59.25	2.10	3.55%
12	B1121	rMn/Ga	4	143.07	4.92	3.44%
12	B1121	rMn/Ti	4	19.02	.75	3.92%
12	B1121	rMn/N	4	20.45	.66	3.25%

.../... suite du tableau 63

13	B1131	rMn/Li	4	179.453	3.956	2.204%
13	B1131	rMn/Ra	4	61.34	.83	1.36%
13	B1131	rMn/Gr	4	31.56	1.18	3.73%
13	B1131	rMn/Ga	4	106.38	1.98	1.86%
13	B1131	rMn/Ti	4	13.32	.47	3.52%
13	B1131	rMn/N	4	12.35	.31	2.50%
14	B1141	rMn/Li	4	226.950	5.051	2.226%
14	B1141	rMn/Ra	4	87.56	2.61	2.98%
14	B1141	rMn/Gr	4	42.53	1.10	2.58%
14	B1141	rMn/Ga	4	135.82	3.25	2.39%
14	B1141	rMn/Ti	4	18.19	.35	1.94%
14	B1141	rMn/N	4	16.93	.39	2.28%
15	B1151	rMn/Li	4	168.083	2.588	1.540%
15	B1151	rMn/Ra	4	70.31	1.75	2.49%
15	B1151	rMn/Gr	4	26.73	1.25	4.66%
15	B1151	rMn/Ga	4	79.71	1.09	1.37%
15	B1151	rMn/Ti	4	7.64	.30	3.88%
15	B1151	rMn/N	4	10.53	.30	2.84%
16	B1161	rMn/Li	4	179.148	2.127	1.187%
16	B1161	rMn/Ra	4	58.05	2.00	3.45%
16	B1161	rMn/Gr	4	30.92	.90	2.91%
16	B1161	rMn/Ga	4	104.95	1.78	1.70%
16	B1161	rMn/Ti	4	12.25	.35	2.85%
16	B1161	rMn/N	4	11.82	.37	3.16%
17	B1171	rMn/Li	4	238.678	5.311	2.225%
17	B1171	rMn/Ra	4	71.69	2.31	3.22%
17	B1171	rMn/Gr	4	30.87	.81	2.61%
17	B1171	rMn/Ga	4	64.19	2.35	3.66%
17	B1171	rMn/Ti	4	16.94	.38	2.26%
17	B1171	rMn/N	4	16.02	.14	.89%
18	B1181	rMn/Li	4	258.513	3.190	1.234%
18	B1181	rMn/Ra	4	114.87	2.33	2.03%
18	B1181	rMn/Gr	4	35.54	.75	2.11%
18	B1181	rMn/Ga	4	74.20	1.69	2.28%
18	B1181	rMn/Ti	4	18.41	.56	3.03%
18	B1181	rMn/N	4	19.82	.82	4.1[illegible]%

C - sol sur alluvion.

Modalité	Colonne		Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1	A001	Mn/Li	3	158.783	5.913	3.724%
1	A001	Mn/Ra	3	53.95	2.77	5.14%
1	A001	Mn/Gr	3	27.05	1.71	6.31%
1	A001	Mn/Ga	3	31.10	1.58	5.07%
1	A001	Mn/Ti	3	5.44	.31	5.65%
2	A.511	Mn/Li	3	181.896	6.039	3.320%
2	A.511	Mn/Ra	3	64.46	2.05	3.18%
2	A.511	Mn/Gr	3	32.06	1.62	5.05%
2	A.511	Mn/Ga	3	42.05	1.50	3.56%
2	A.511	Mn/Ti	3	6.39	.35	5.43%
3	A811	Mn/Li	3	132.883	4.331	3.259%
3	A811	Mn/Ra	3	28.11	1.68	5.99%
3	A811	Mn/Gr	3	27.52	2.27	8.24%
3	A811	Mn/Ga	3	31.91	1.58	4.95%
3	A811	Mn/Ti	3	6.45	.40	6.15%
4	A.5161	Mn/Li	3	314.232	8.568	2.727%
4	A.5161	Mn/Ra	3	182.87	3.94	2.15%
4	A.5161	Mn/Gr	3	59.16	.06	.10%
4	A.5161	Mn/Ga	3	78.69	3.96	5.03%
4	A.5161	Mn/Ti	3	14.44	.53	3.70%
5	A8161	Mn/Li	3	195.645	6.712	3.430%
5	A8161	Mn/Ra	3	57.59	2.47	4.30%
5	A8161	Mn/Gr	3	33.42	1.88	5.63%
5	A8161	Mn/Ga	3	59.21	2.92	4.93%
5	A8161	Mn/Ti	3	8.44	.45	5.37%

* la légende est la même que celle du tableau 55.

Tableau 64 : Analyse de variance de l'influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur l'accumulation du manganèse dans les différents organes du blé.

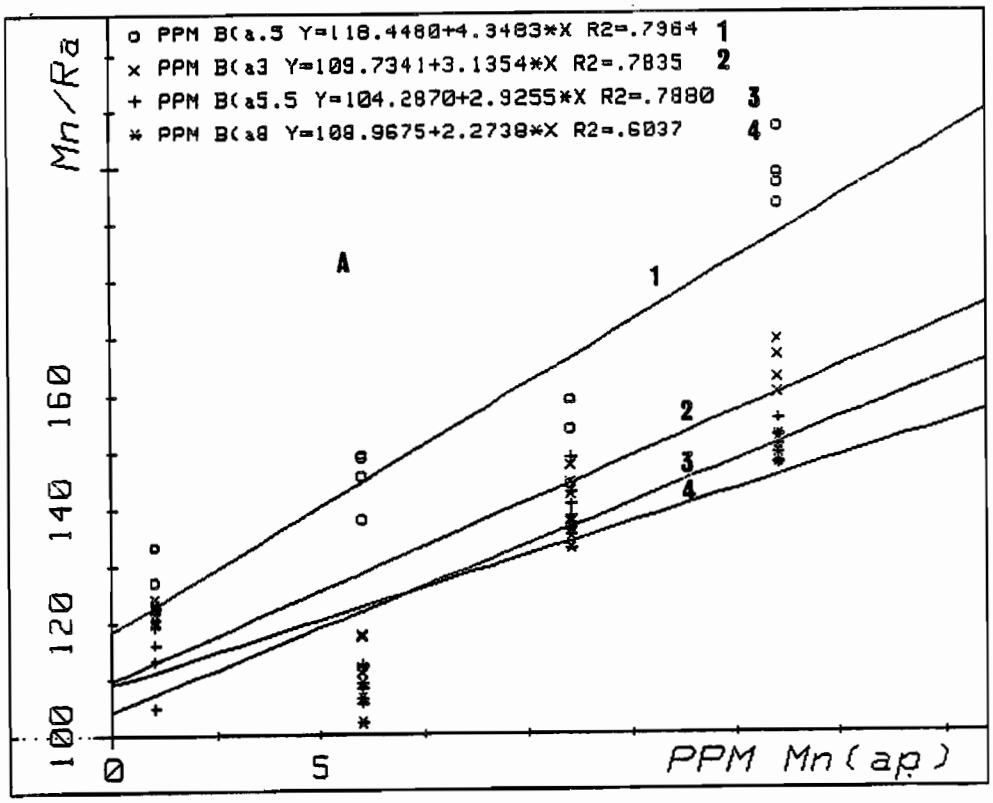
Sol	Elément apporté	Fonction discriminante de loi de Snedecor (F)					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	2,03 *	27,97 *	40,84 *	10,34 *	16,36 *	
	B	6,53	6,89 *	0,44	4,95	5,95 *	
	Mn+B	18,77 *	62,12 *	31,57 *	133,45 *	74,86 *	
Sol de rendzine	Mn	3,90	26,80 *	8,07 *	17,52 *	7,21 *	5,21
	B	4,46	0,38	1,82	5,12 *	3,97 *	3,97
	Mn+B	733,75 *	49,98 *	249,90 *	89,52 *	108,04 *	108,04 *
Sol sur alluvion	Mn	2,77	2,74	46,84	7,86	2,42	
	B	3,30	0,96	10,05	5,80	2,04	
	Mn+B	827,64 *	143,43 *	9,05 *	83,61 *	119,34 *	

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 65 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du manganèse dans les différents organes du blé en fin d'expérience.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation (r)				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	Mn	0,85 *	0,97 *	0,99 *	0,85 *	0,87 *
	B	-0,11	-0,07	-0,16	-0,27	-0,21
Sol de rendzine	Mn	0,72 *	0,89 *	0,72 *	0,76 *	0,66 *
	B	-0,31	-0,08	-0,28	-0,38	-0,21
Sol sur alluvion	Mn	0,64 *	0,81 *	0,92 *	0,76 *	0,71 *
	B	-0,50	-0,17	-0,11	-0,40	-0,34

* r : significatif au niveau de 0,99.



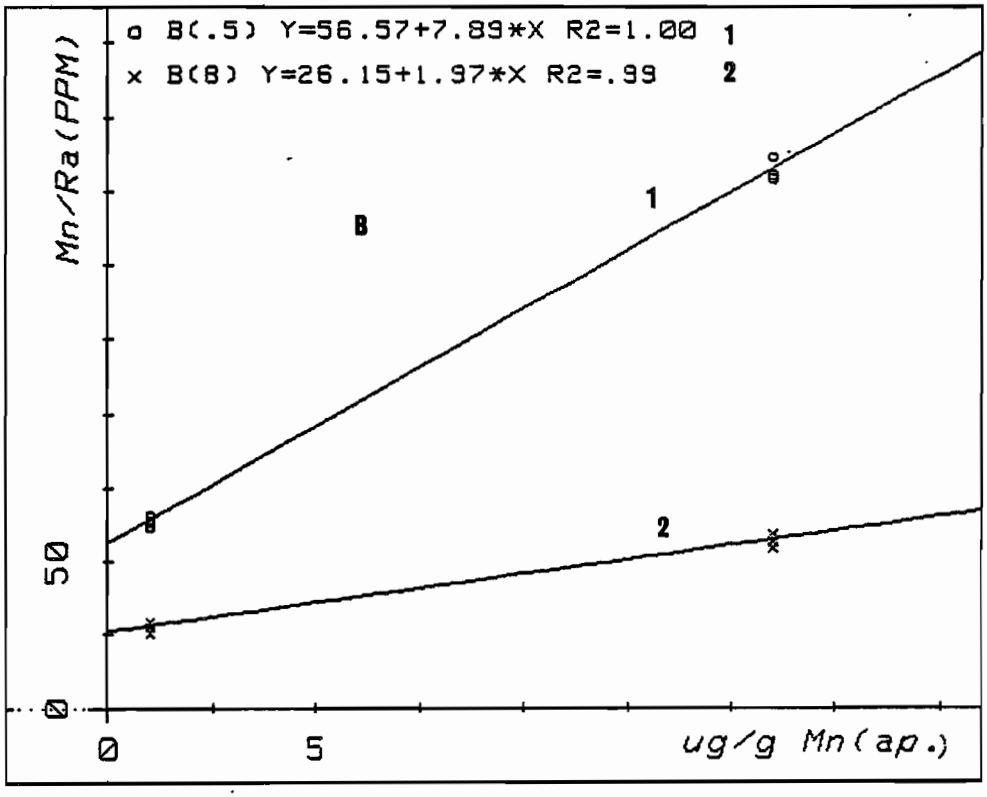


Figure 71 - Relation (au moyen de l'analyse de régression) entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du manganèse dans les racines :

A - sol brun lessivé sur limon.

B - sol sur alluvion.

1.2.2. Le manganèse dans les tiges.

Les tiges sont très pauvres en manganèse par rapport aux autres organes (tableau 63). Elles ne fixent donc qu'une partie très faible du manganèse qui transite vers les autres parties aériennes, au stade floraison ; cette fixation est plus importante surtout dans le cas du sol sur limon. L'augmentation de la concentration des tiges en manganèse est faible. La tige est l'organe qui contient le moins de manganèse lorsque le blé est cultivé sur sol sur alluvion. L'application du bore à différentes doses n'est mis en évidence ni par l'analyse de variance, ni par le coefficient de corrélation (tableaux 64 et 65).

Par contre, l'analyse de variance ainsi que le coefficient de corrélation ont prouvé une influence significative de l'application du manganèse sur sa concentration dans les tiges (tableaux 64 et 65). L'interaction entre le bore et le manganèse a une influence significative sur la concentration du manganèse dans les tiges ; tous ces effets sont valables pour les trois sols.

Les courbes de régression (fig. 72 A et B) montrent une relation importante entre la fertilisation en bore et manganèse et la concentration du manganèse dans les tiges ($R^2 > 85$).

1.2.3. Le manganèse dans les gaines.

Après les limbes, les gaines sont l'organe le plus riche en manganèse (tableau 63) ; leur teneur est la plus importante au stade maturation. L'accroissement de cette teneur est plus accentué en fonction de la dose du manganèse au stade maturation par rapport aux deux autres stades. Les gaines sont plus riches lorsque le blé est cultivé sur sol sur limon que sur sol de rendzine et encore plus que sur sol sur alluvion.

La décroissance de la concentration des gaines en manganèse, en fonction de la fertilisation en bore, n'est pas mise en évidence par l'analyse de variance (tableau 64) ni par le coefficient de corrélation (tableau 65). L'accroissement de l'accumulation du manganèse dans les gaines, sous l'influence de la fertilisation en manganèse ainsi que l'action de Mn + B, sont mis en évidence par l'analyse de variance (tableau 64). Une corrélation significative entre l'accumulation en manga-

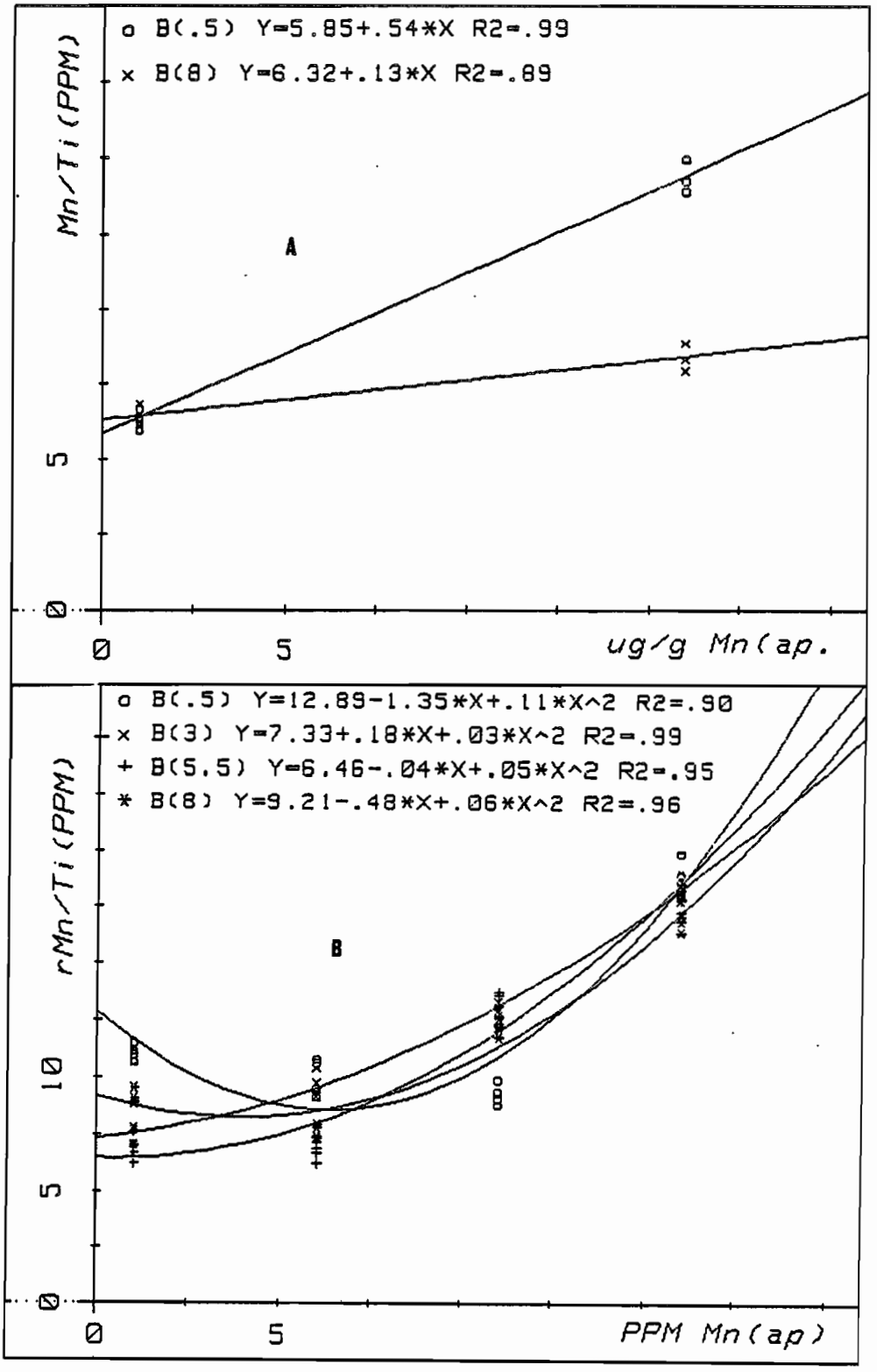
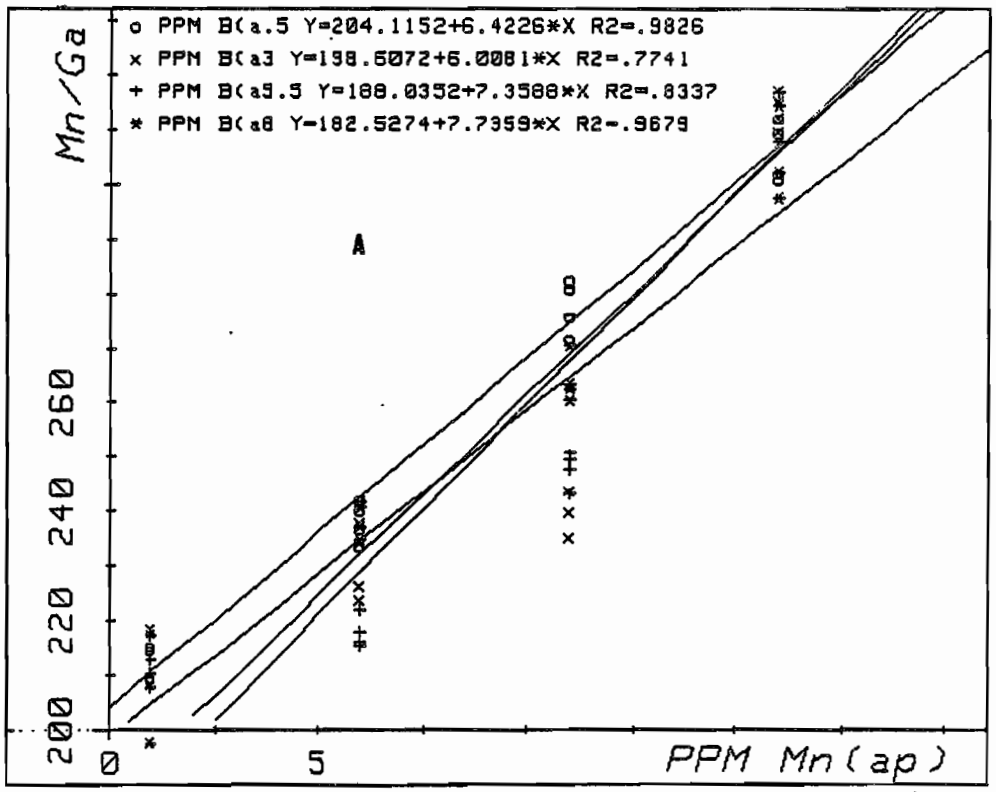


Figure 72 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du manganèse dans les tiges :

A - sol sur alluvion

B - sol de rendzaine (r)



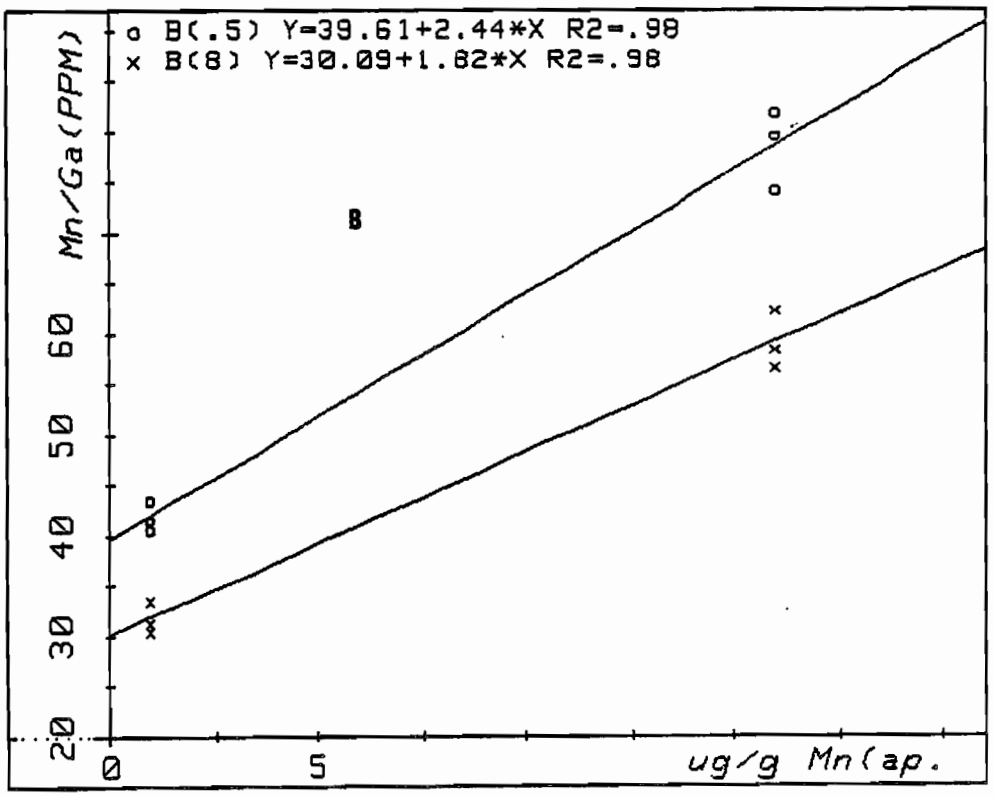


Figure 73 - Relation entre la fertilisation en manganèse et bore et l'accumulation du manganèse dans les gaines.

A - sol sur limon.

B - sol sur alluvion.

nèse et la fertilisation en cet élément ressort du tableau 65. Les droites de régression (fig. 73 A et B) montrent nettement une liaison très importante ($R^2 > 0,75$), entre la fertilisation et l'accumulation du manganèse dans les gaines ; elles montrent aussi le faible effet des doses fortes en bore sur cette liaison.

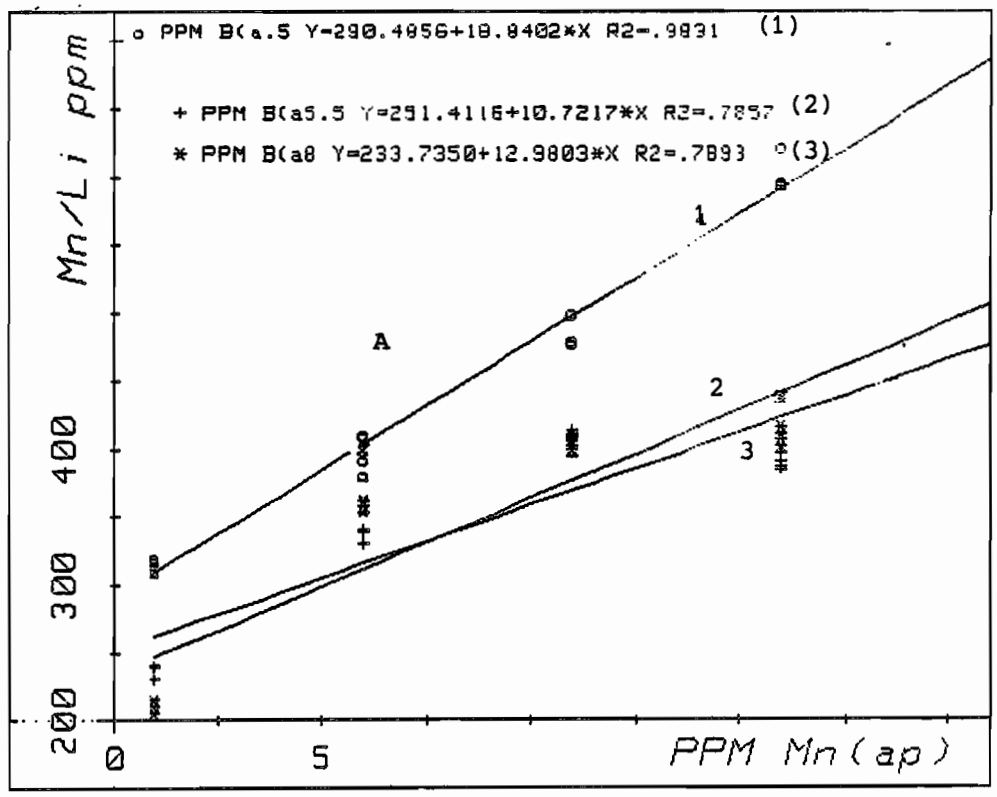
1.2.4. Le manganèse dans les limbes.

Les limbes accumulent le plus de manganèse parmi tous les organes de blé cultivé sur les trois sols (tableau 63) et dans l'ordre suivant : sol sur limon > sol de rendzine > sol sur alluvion. La concentration des limbes est peu importante au stade début de tallage ; elle croît jusqu'au stade floraison puis elle décroît au stade maturation, ce qui laisserait penser à une migration secondaire (des limbes vers les autres organes).

L'accroissement de l'accumulation du manganèse est important mais non pas proportionnel à l'augmentation de la dose appliquée de cet élément (tableau 63) : l'application d'une dose de 16 $\mu g.g^{-1}$ du manganèse n'augmente sa concentration dans les limbes que de 1,9 fois dans le cas du sol sur limon, de 1,7 fois dans le cas du sol de rendzine et de 1,7 fois dans le cas du sol sur alluvion. Cette augmentation est mise en évidence par l'analyse de variance (tableau 64) et par le coefficient de corrélation (tableau 11). Cette analyse fait apparaître aussi l'effet de l'interaction des deux oligoéléments ; par contre, elle ne fait pas apparaître l'effet de la fertilisation en bore, de même que le coefficient de corrélation. Cependant, les valeurs de F et de r, dans ce cas, (tableaux 64 et 65) sont importantes, ce qui laisse penser à la présence d'un effet négatif du bore sur l'accumulation du manganèse dans les limbes mais qui n'est pas significatif lorsqu'il est pris sur l'ensemble des doses. D'ailleurs, cet effet est souligné par les droites de régression (fig. 74 A et B) qui montrent un R^2 plus grand pendant l'application du bore en 0,5 $\mu g.g^{-1}$ par rapport aux cas de son application en excès, notamment pour le sol sur limon.

1.2.5. Le manganèse dans les grains.

Le tableau 63 montre que les grains sont moins riches que les autres organes, excepté les tiges ; ils sont plus riches dans le



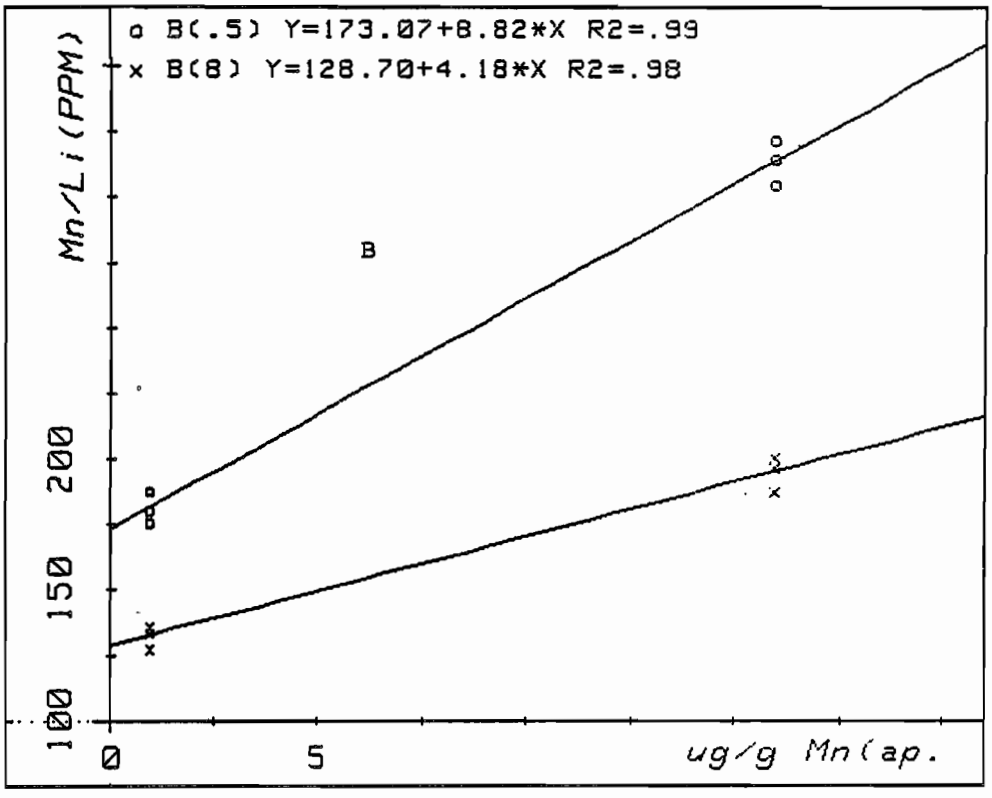


Figure 74 - Relation entre la fertilisation en manganèse et en bore et l'accumulation du manganèse dans les limbes

A - sol brun lessivé sur limon.

B - sol sur alluvion.

de culture sur sol sur limon que sur sol sur alluvion et encore plus que sur sol de rendzine.

Les épis au stade floraison sont plus riches en manganèse que les grains au stade maturation (respectivement, pour une fertilisation complète : 102,8 et 67,76 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol sur limon, 72,6 et 28,83 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol de rendzine).

L'accroissement de la concentration en manganèse dans les grains , tout en étant important, n'est pas proportionnel à l'augmentation de sa dose appliquée. Cet accroissement est mis en évidence par l'analyse de variance (tableau 64). Par contre, ni cette analyse, ni le coefficient de corrélation ne mettent en évidence l'effet du bore (tableau 65). Cependant, si l'on étudie le tableau 64 pour chaque dose appliquée, on observe qu'il existe néanmoins une faible baisse. Une corrélation significative existe entre la fertilisation en manganèse et sa concentration dans les grains pour les trois sols (tableau 65). Nous avons trouvé une corrélation significative entre les concentrations des différents organes de blé cultivé sur les trois sols (tableau 65).

Les courbes de régression (fig. 75 A, B et C) montrent une liaison entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration des grains.

Un dosage du manganèse dans les noeuds a été effectué, indiquant que ceux-ci sont les plus pauvres en manganèse après les tiges et montrant que l'effet de la fertilisation en manganèse sur sa concentration y est mis en évidence par l'analyse de variance. Il en va de même dans le cas de fertilisation en bore et de l'interaction de ces deux éléments (respectivement F = 24,79, F = 13,64 et F = 17,77 au niveau de 0,99).

VIII.1.3. Autres oligoéléments.

Nous regroupons, ici, les résultats pour tous les organes de blé.

1.3.1. Le cuivre.

La concentration du cuivre dans les organes du blé est très faible par rapport aux autres éléments traces étudiés. Dans les diffé-

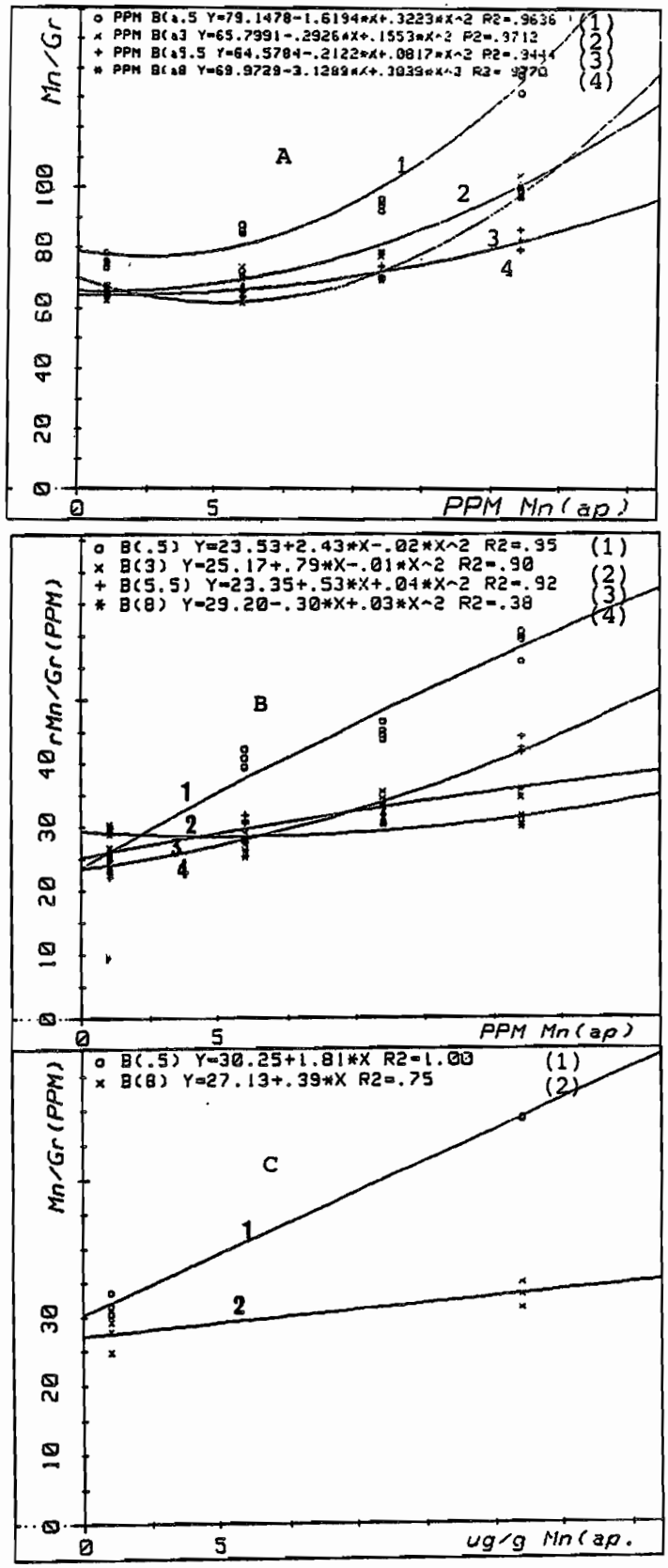


Figure 75 - Relation entre le fertilisation en manganèse et en bore et l'accumulation du manganèse dans les grains.

A - sol sur limon
B - sol de rendzine (r).
C - sol sur alluvion.

Tableau 66 : Corrélations* entre les concentrations en manganèse des différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

Sol	Organe	Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
	Racines		0,93	0,88	0,96	0,96
Sol sur limon	Tiges			0,97	0,94	0,95
	Gaines				0,88	0,88
	Limbes					0,98
	Racines		0,83	0,98	0,97	0,97
Sol de rendzine	Tiges			0,78	0,81	0,78
	Gaines				0,88	0,98
	Limbes					0,92
	Racines		0,93	0,87	0,98	0,98
Sol sur alluvion	Tiges			0,94	0,95	0,98
	Gaines				0,94	0,91
	Limbes					0,98

* Coefficients de corrélation tous significatifs au niveau de probabilité 0,99.

rents organes, elle suit l'ordre décroissant suivant : racines > limbes > gaines > grains > tiges. La différence entre les deux derniers organes est faible. Pour une fertilisation complète (FC), ces teneurs sont respectivement, en $\mu g.g^{-1}$ cuivre de matière sèche : 46,96 > 14,92 > 6,91 > 5,47 > 3,73 dans le cas du sol sur limon, 28,55 > 11,65 > 5,03 > 3,82 > 3,35 dans le cas su sol de rendzine et 24,39 > 9,43 > 5,05 > 3,31 > 3,14 dans le cas du sol sur alluvion ; ces teneurs montrent aussi que les organes de blé cultivé sur sol sur alluvions prélèvent moins de cuivre que dans le cas du sol de rendzine et encore moins que dans celui du sol sur limon.

Au stade début de tallage les limbes et les racines retiennent moins de cuivre qu'au stade floraison et au stade maturation, tandis que les gaines en retiennent plus. Au stade floraison, la concentration du cuivre dans les tiges, les gaines et les épis, est plus importante qu'au stade maturation, tandis que dans les limbes et les racines elle est moins importante. L'effet de la fertilisation en bore n'est mis en évidence en aucun cas (tableau 67). L'effet de la fertilisation en manganèse sur la concentration en cuivre des différents organes varie d'un organe à l'autre ; il est mis en évidence par l'analyse de variance, dans les trois sols étudiés pour les racines et les limbes, ainsi que pour les gaines pour le sol sur limon.

L'effet du bore et celui du manganèse, appliqués ensemble, sont souvent mis en évidence (talbeau 67). La figure 76 montre un exemple de cette interaction exprimée par l'analyse de régression. Nous avons trouvé une corrélation négative et significative entre la fertilisation en manganèse et la concentration en cuivre dans les racines pour les trois sols et dans les gaines pour le sol sur limon et pour celui de rendzine (tableau 68). Cette corrélation est positive et significative pour les limbes dans les trois sols et pour les grains dans le cas du sol sur limon et le sol de rendzine ; dans les autres organes, aucune corrélation n'a été décelée (tableau 68). La concentration en cuivre n'est corrélée avec la fertilisation en bore que dans le cas des grains de blé cultivé sur les sols sur alluvion et de rendzine, et dans celui des tiges du blé cultivé sur sol de rendzine (tableau 68). Nous constatons donc que, d'une façon générale, le manganèse affecte plus que le bore la concentration du cuivre des organes ; les droites de régression de la figure 76 le montrent pour les limbes dans le cas du sol sur alluvion.

Nous avons cherché, au moyen d'analyse de régression, la relation entre la concentration en cuivre dans les différents organes et leurs concentrations en bore et en manganèse. La figure 77 nous montre quelques exemples. Il est important de retenir la liaison linéaire existant entre les teneurs des oligoéléments dans les différents organes, ce qui nous ouvrirait la possibilité d'avoir une idée des teneurs en cuivre de certains organes à partir de leur teneur en bore ou en manganèse.

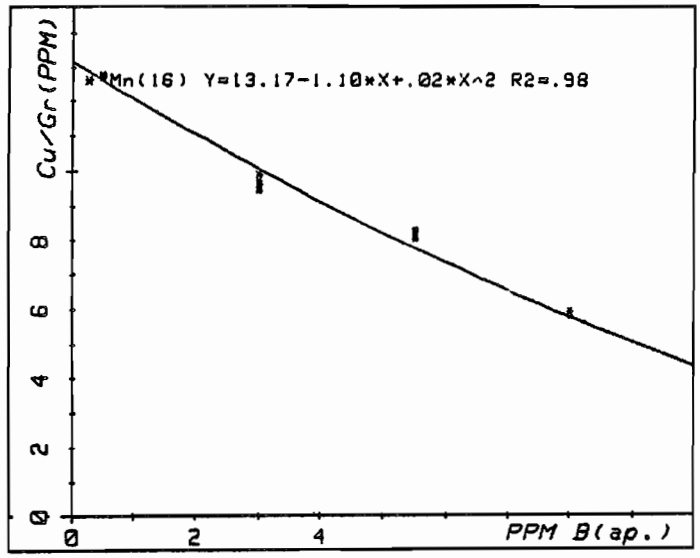
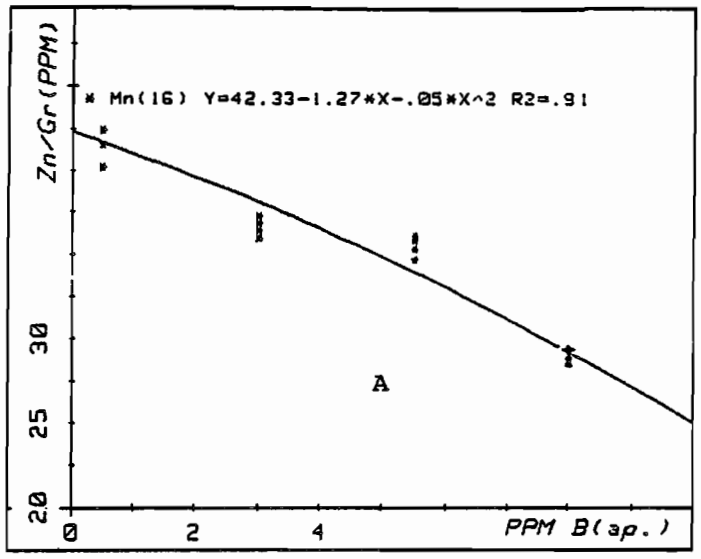


Figure 76 - Relation entre la fertilisation en bore et manganèse et la concentration du cuivre dans les grains de blé cultivés sur sol sur limon.



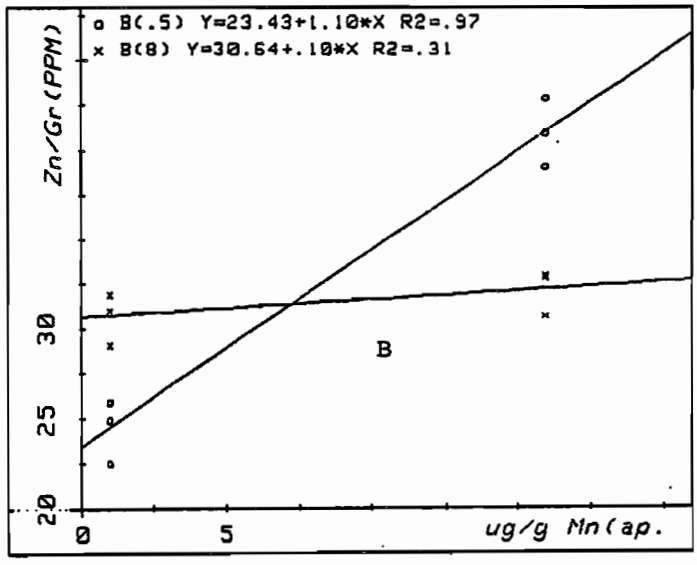


Figure 77 - Relation entre la fertilisation en bore et manganèse et l'accumulation du zinc dans les grains.
A - sol sur limon · B - sol sur alluvion.

Tableau 67 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la concentration du cuivre dans les différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

Sol	Elément apporté	Valeurs de F				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	Mn	8,60*	1,05	8,01*	7,14*	5,75*
	B	1,34	0,44	0,63	5,20	2,84
	Mn+B	58,28*	58,91*	59,04*	126,56*	377,29*
Sol de rendzine	Mn	8,31*	1,27	2,26	9,43*	1,76
	B	4,39	2,01	3,62	6,32	1,08
	Mn+B	90,90*	184,78*	56,13*	43,52*	323,17*
Sol sur alluvion	Mn	160,97*	0	1,67	328,97*	18,14
	B	16,41	0,04	6,15	82,53	18,34
	Mn+B	1,99	264,22*	83,27*	0,66	12,69*

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 68 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la corrélation du cuivre dans les différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	Mn	-0,79*	0,20	-0,77*	0,84*	0,54*
	B	0,14	0,28	-0,16	-0,25	-0,19
Sol de rendzine	Mn	-0,77*	-0,09	-0,56*	0,84*	0,52*
	B	0,40	0,65*	-0,07	-0,26	0,54*
Sol sur alluvion	Mn	-0,78*	0,43	0,52	0,91*	-0,36
	B	0,31	0,32	-0,54	-0,12	0,75*

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

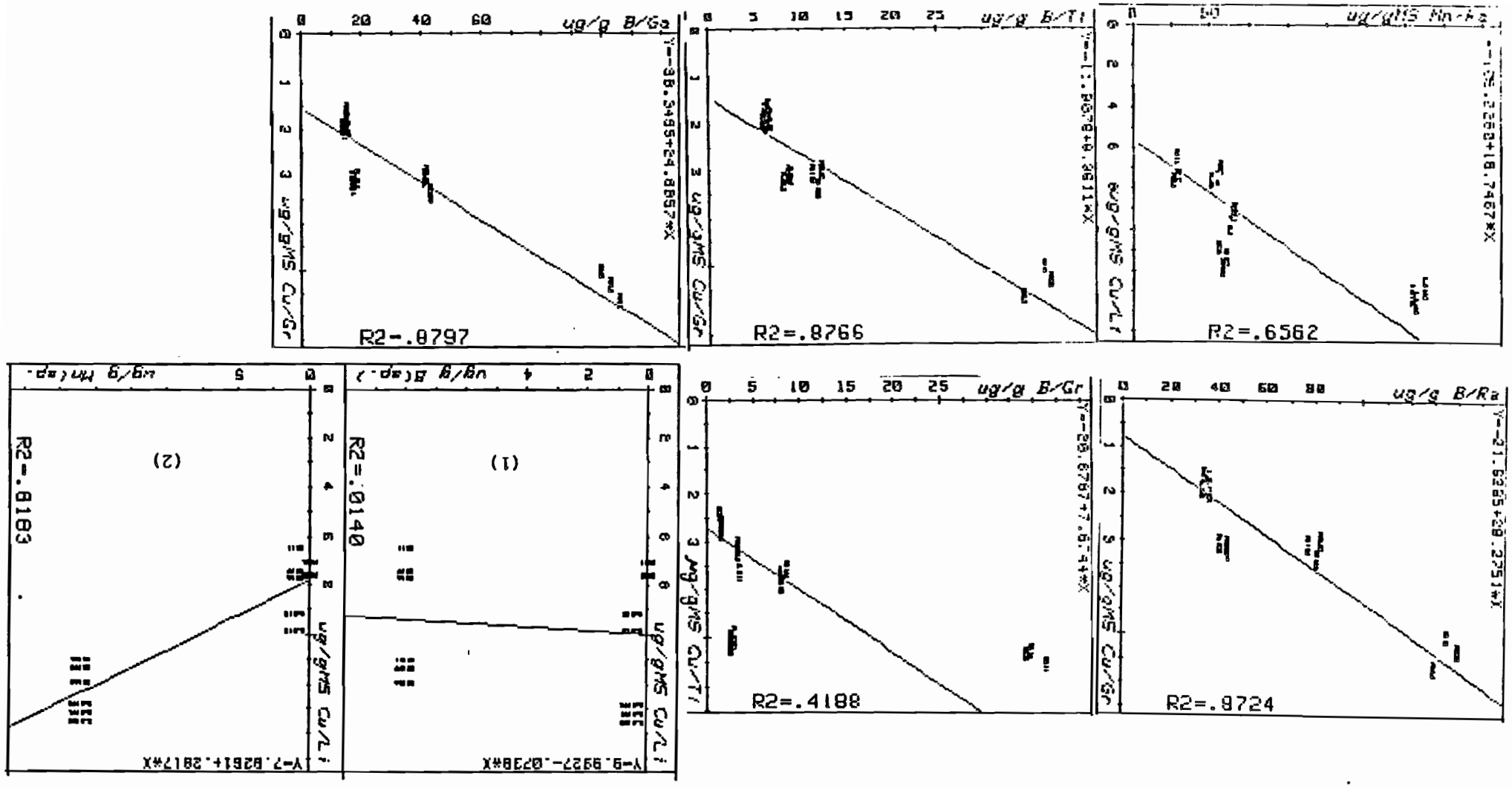


Figure 77 B - Relation entre le fertilisation en bore (1) et en manganèse (2) et la concentration du cuivre dans les limbes du blé cultivé sur sol sur alluvion.

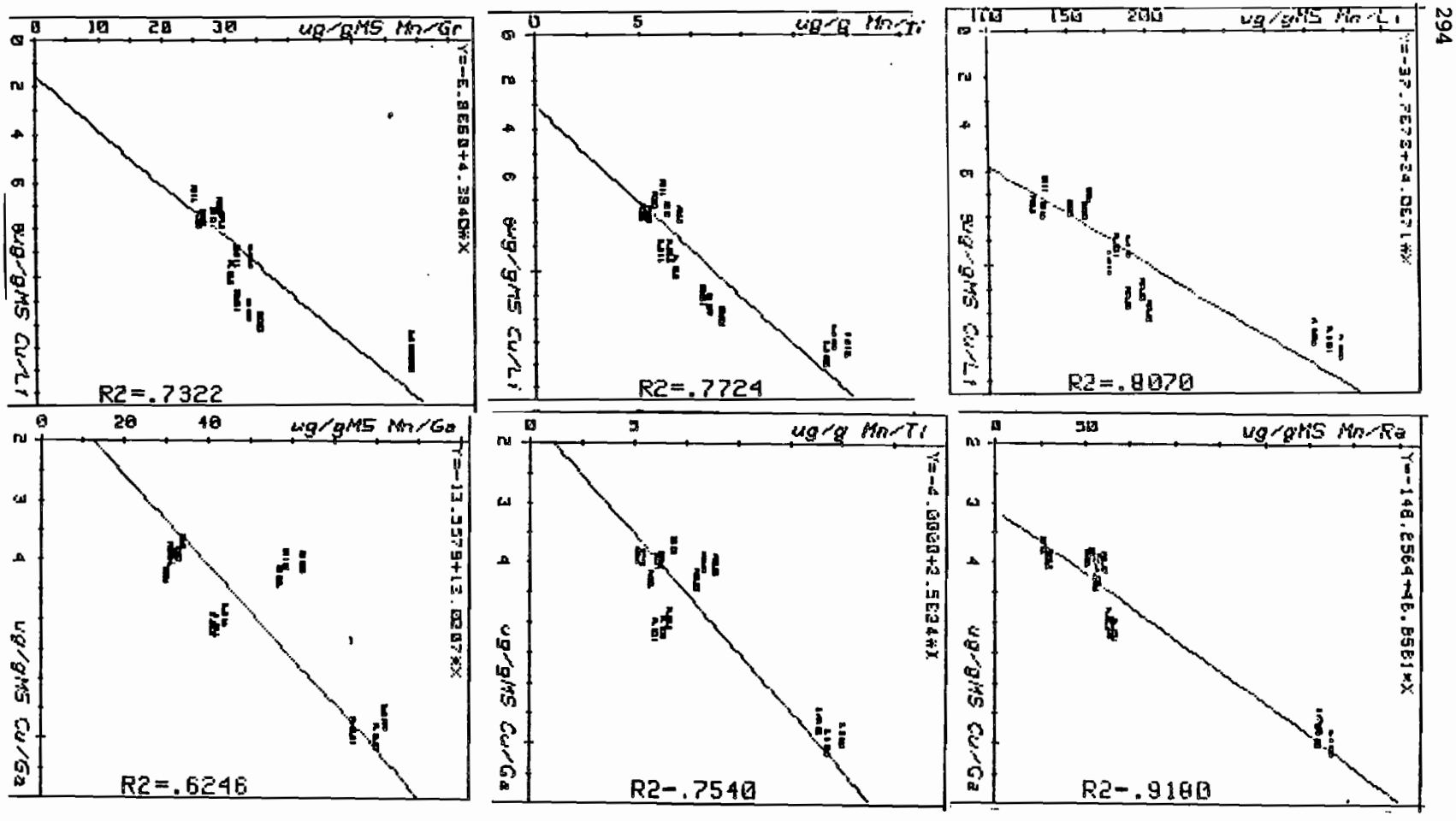


Figure 77 A - Relation entre la concentration en bore ou en manganèse des différents organes du blé cultivé sur sol sur alluvion et la concentration en cuivre de ces organes.

1.3.2. Le zinc.

Les racines et les gaines sont les organes les plus riches en zinc. La différence de concentration entre organes est moins importante que dans le cas des autres éléments. Lorsque le blé est cultivé sur sol sur limon, les racines contiennent 84,6 $\mu g.g^{-1}$ de zinc contre: 60,0 $\mu g.g^{-1}$dans les gaines, 56,4 $\mu g.g^{-1}$dans les limbes, 37,3 $\mu g.g^{-1}$ dans les tiges et 27,4 $\mu g.g^{-1}$dans les grains. Ces teneurs, comme pour les autres oligoéléments, sont plus faibles dans le cas du sol de rendzine et encore plus faible dans le cas du sol sur alluvion. Les teneurs moins différentes entre organes que les autres oligoéléments montrent que la migration entre les organes se fait bien.

Les racines, les limbes et les gaines sont plus riches en zinc au stade début de tallage qu'aux deux autres stades, ce qui montre, à ce stade, que les plants de blé prélèvent plus de zinc par rapport à leur poids sec. Le prélèvement du zinc décroît avec l'âge : il est moins important au stade floraison et encore moins au stade maturation. L'effet de la fertilisation en manganèse sur la décroissance de l'accumulation du zinc constaté, au moyen de l'analyse de variance, n'est mis en évidence sur aucun organe de blé cultivé sur sol de rendzine ou sur sol sur alluvion ; par contre, il est mis en évidence sur les tiges, les limbes et les grains du blé cultivé sur sol sur limon (tableau 69). L'effet du bore n'est mis en évidence en aucun cas (tableau 69). L'effet de l'application simultanée du bore et du manganèse (Mn+B) est systématiquement mis en évidence, sauf pour les gaines dans le cas du sol sur alluvion (tableau 69).

Le tableau 70 regroupe les coefficients de corrélation entre l'application du bore ou du manganèse et la concentration du zinc dans les différents organes du blé. Nous constatons que les corrélations varient d'un organe à l'autre et qu'elles sont rarement significatives.

La figure 78 A et B nous donne un exemple de la liaison importante entre la fertilisation en bore et manganèse et la teneur de zinc dans les grains. Nous constatons une baisse importante de cette teneur sous l'effet de l'apport de 16 $\mu g.g^{-1}$ du manganèse avec l'apport des différentes doses du bore (fig. 78 A) ; par contre, la concentration du zinc dans les grains augmente en fonction de l'apport du man-

Tableau 69 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la teneur du zinc dans les différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

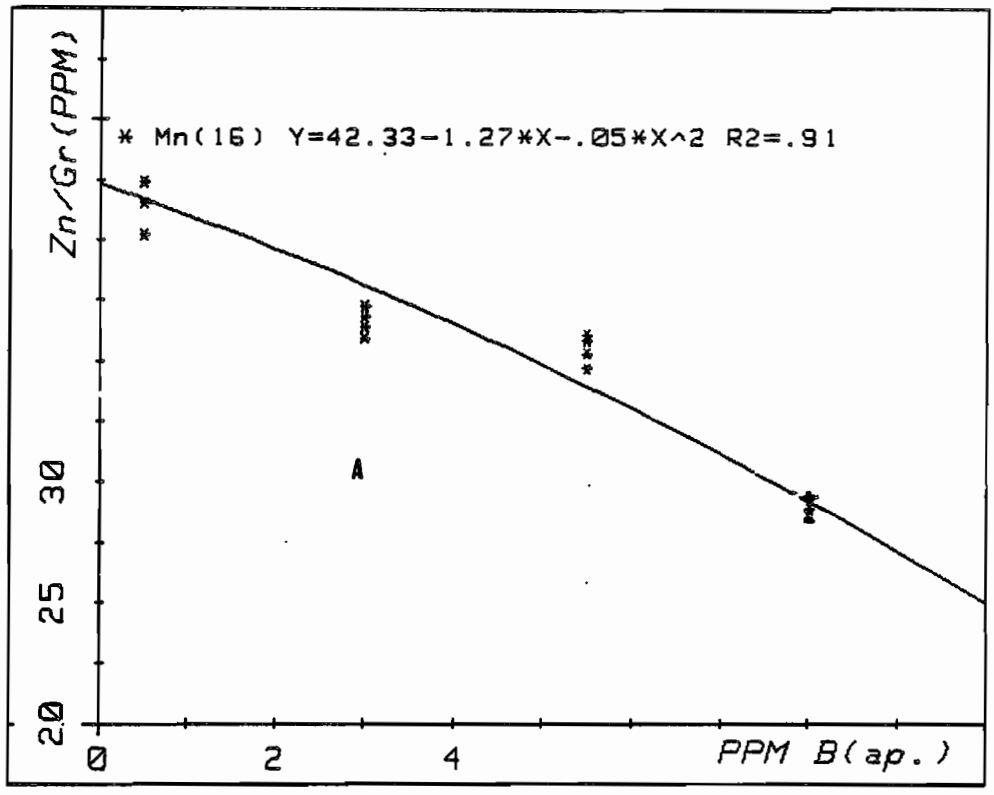
Sol	Elément apporté	Valeurs de F				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	Mn	1,82	7,28*	0,85	12,13*	8,71*
	B	5,30	0,52	0,37	4,45	3,12
	Mn+B	89,23*	84,58*	422,06*	23,86*	39,74*
Sol de rendzine	Mn	1,70	1,53	0,44	2,06	1,58
	B	5,98	0,50	0,26	0,33	0,82
	Mn+B	51,21*	96,10*	39,39*	56,22*	52,88*
Sol sur alluvion	Mn	0,50	8,89	10,92	0,29	1,44
	B	0,39	28,81	18,59	0,01	0,03
	Mn+B	58,15*	9,40*	2,85	27,58*	64,93*

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 70 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du zinc dans les différents organes du blé cultivé sur trois sols.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	Mn	0,17	0,31	-0,38	-0,75*	0,77
	B	-0,89*	-0,01	-0,29	-0,45	0,22
Sol de rendzine	Mn	0,70*	-0,10	-0,39	0,75*	0,66*
	B	-0,34	0,87*	0,74*	0,38	0,36
Sol sur alluvion	Mn	0,57	-0,19	-0,36	0,59	0,79*
	B	-0,22	0,88*	0,76*	0,28	0,24

* significatif au niveau de 0,99.



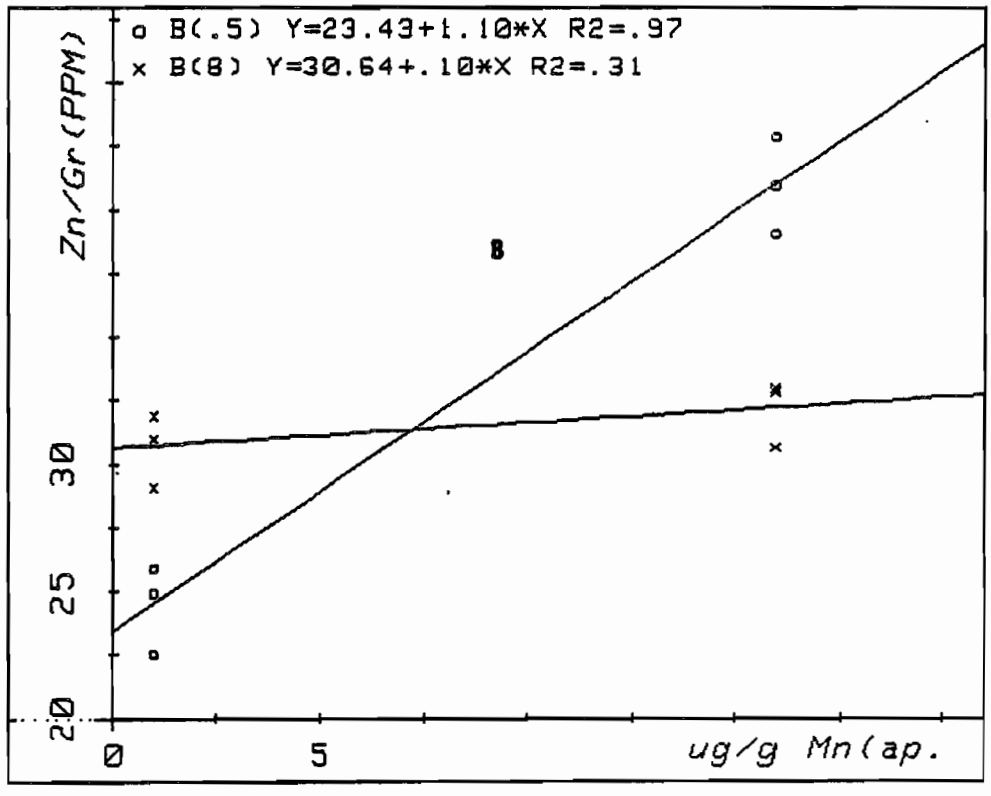


Figure 78 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du zinc dans les grains.
A - Sol sur limon.
B - Sol sur alluvion.

ganèse lorsque le bore est apporté en dose 0,5 $\mu g.g^{-1}$ (fig. 77 B). La présence des doses fortes des deux éléments réduit plus la concentration des grains en zinc (fig. 77).

1.3.3. Le fer.

Les racines en sont nettement plus riches que les autres organes tandis que les grains en sont les plus pauvres ; dans les trois sols, la concentration en fer décroît dans l'ordre suivant : racines > gaines > limbes > tiges > grains. Ces concentrations (en $\mu g.g^{-1}$) sont respectivement, en cas de fertilisation complète : 3950,7 > 376,4 > 278,9 > 86,7 > 66,2 pour le sol sur limon, 2013,7 > 193,7 > 183,6 > 140,2 > 57,1 pour le sol de rendzine et 2060,0 > 271,9 > 207,6 > 175,8 > 77,1 pour le sol sur alluvion. Ces chiffres permettent de constater que le blé cultivé sur sol sur limon prélève plus de fer que celui sur sol sur alluvion et encore plus que celui sur sol de rendzine ; ils montrent aussi que la migration du fer vers les grains est faible. Le dosage du fer dans les noeuds, effectué uniquement en cas du sol de rendzine, a fait apparaître que les noeuds sont les plus pauvres en fer (31,19 $\mu g.g^{-1}$).

L'évolution de prélèvement du fer par le blé, en fonction du stade de développement, varie d'un organe à l'autre. La concentration du fer dans les limbes et les gaines croît en fonction de l'âge tandis qu'elle décroît relativement dans les racines avec l'âge. Au stade de floraison, les épis accumulent plus de fer tandis que les tiges en ont moins qu'au stade maturation.

L'influence de la fertilisation en manganèse sur la décroissance des concentrations des organes en fer et, par conséquent, la diminution du prélèvement de cet élément par le blé, est, selon l'analyse de variance, significative dans les limbes pour les sols sur alluvion et de rendzine, tandis qu'elle n'est pas mise en évidence dans les autres organes (tableau 71). Il en est de même pour l'influence du bore dans le cas du sol de rendzine ainsi que pour les grains (tableau 71). Par contre, l'influence du bore plus le manganèse est systématiquement mise en évidence. Comme l'indique le tableau 72, une corrélation négativement significative (au niveau 0,99) existe entre la fertilisation en manganèse et la concentration du fer dans les dif-

Tableau 71 : Analyse de variance de l'influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la concentration du fer dans les différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

Sol	Elément apporté	Valeurs de F					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	B	0,41	3,11	1,29	0,86	3,43	
	Mn	0,79	2,87	5,89	27,59*	2,75	
	Mn+B	26,67*	24,53*	85,43*	34,92*	59,98*	
Sol de rendzine	B	0,19	1,56	1,24	10,34*	10,61*	2,82
	Mn	0,10	6,62	0,73	18,34*	6,21*	0,66
	Mn+B	119,32*	47,98*	187,56*	68,14*	52,05*	525,01*
Sol sur alluvion	B	0,14	0,16	0,80	0,62	0,03	
	Mn	190,64	1,70	1,19	4,97	2,87	
	Mn+B	67,87*	46,92*	71,35*	176,68*	201,01*	

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 72 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du fer dans les différents organes du blé cultivé sur les trois sols.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation				
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains
Sol sur limon	B	0,28	0,78*	0,69*	0,50*	0,83*
	Mn	-0,06	-0,32*	-0,66*	-0,92*	-0,42*
Sol de rendzine	B	-0,18	0,70*	0,50*	0,32*	0,64*
	Mn	-0,07	-0,60*	-0,34*	-0,71*	0,43
Sol sur alluvion	B	-0,13	-0,30	-0,56	0,26	0,03
	Mn	-0,66*	-0,75*	-0,65*	-0,78*	-0,81*

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

férents organes du blé cultivé sur sol sur alluvion. Elle l'est également pour les deux autres sols, sauf pour les racines. Lors de l'application du bore, cette corrélation est positivement significative sur l'accumulation du fer dans tous les organes, sauf pour les racines ce qui laisserait supposer que le bore joue sur la migration du fer à l'intérieur des tissus et non pas sur son absorption par les racines.

Dans le cas du sol sur alluvion, l'application du bore n'est pas corrélée avec la concentration en fer dans les organes du blé.

Dans la figure 79 nous montrons, au moyen de l'analyse parabolique de régression, l'effet du bore et du manganèse sur la concentration du fer dans les grains du blé cultivé sur sol de rendzine ; nous constatons que le fer croît en fonction du bore et décroît en fonction du manganèse.

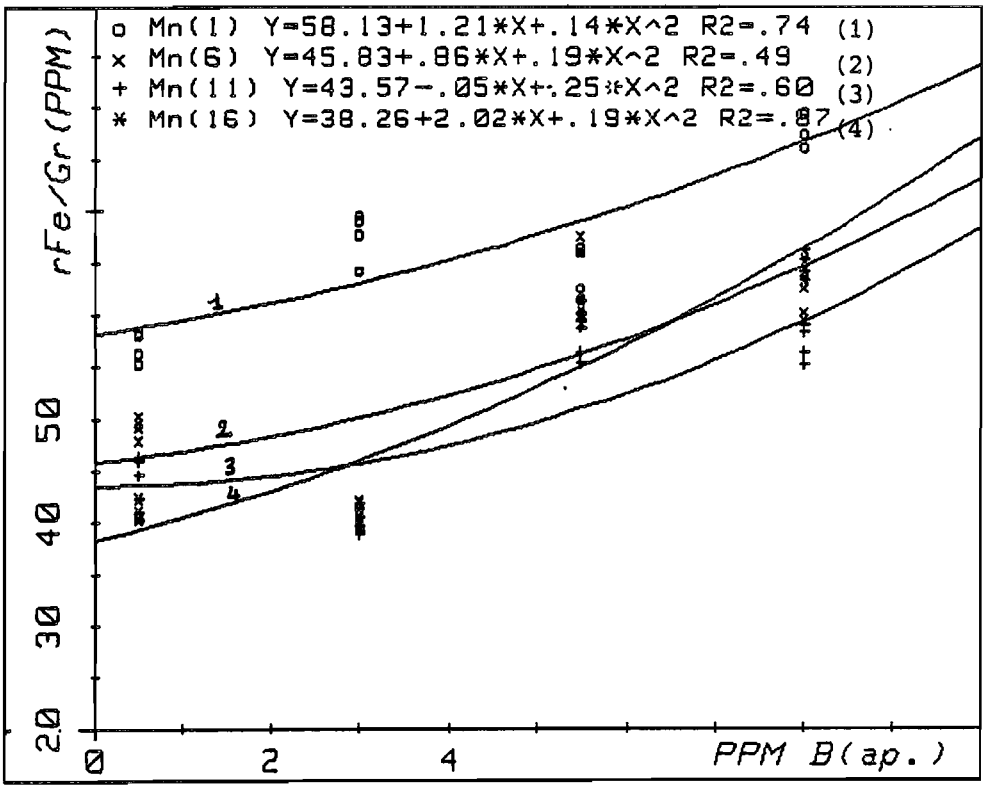


Figure 79 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du fer dans les grains du blé cultivé sur sol de rendzine (r).

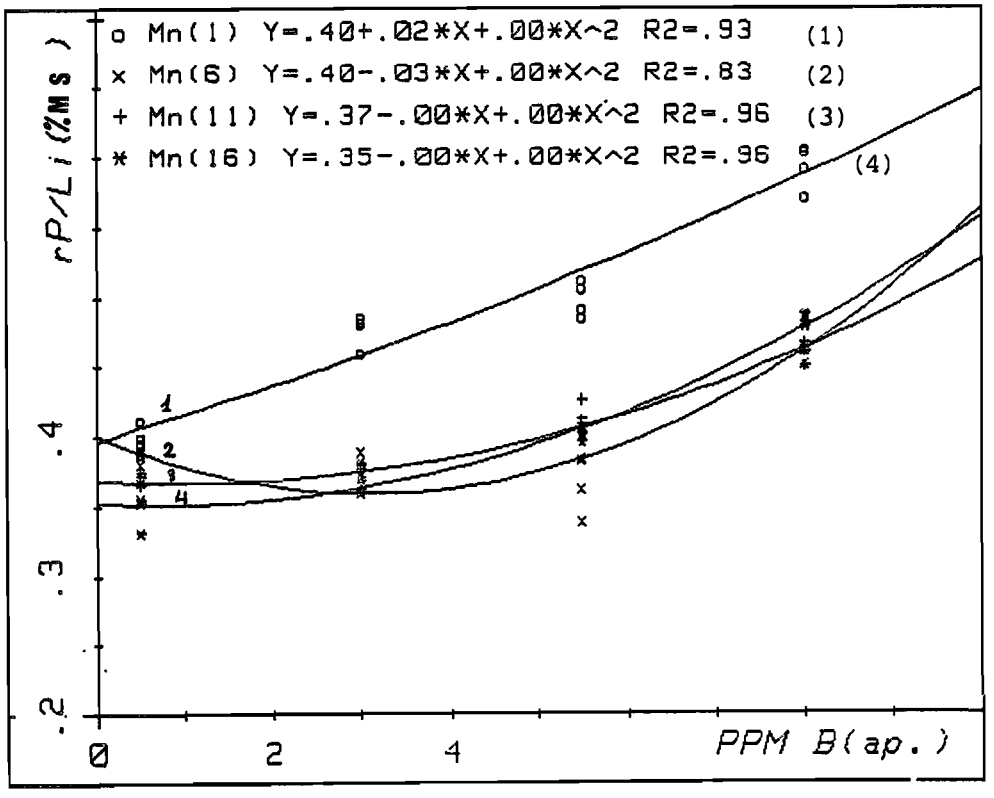


Figure 80-A - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration en phosphore dans les limbes du blé cultivé sur sol sur limon.

VIII.1.4. Eléments majeurs.

1.4.1. Le phosphore.

Les grains constituent l'organe du blé le plus riche en phosphore, tandis que les tiges et les noeuds sont les moins riches. Dans les trois sols, le phosphore décroît dans les organes dans l'ordre suivant : grains > limbes > racines > gaines > tiges > noeuds*. Ces concentrations, en % de matière sèche, sont respectivement, dans le cas de fertilisation complète : 0,63 > 0,43 > 0,079 > 0,074 > 0,061 > 0,044 pour le sol sur limon, 0,48 > 0,40 > 0,074 > 0,074 > 0,042 > 0,045 pour le sol de rendzine et 0,59 > 0,44 > 0,10 > 0,073 > 0,040 pour le sol sur alluvion. Ces résultats montrent que le blé prélève, au total, plus de phosphore quand il est cultivé sur sol sur alluvion que sur sol de rendzine et faiblement plus quand il l'est sur sol sur limon : ce qui est en accord avec le phosphore extractible dans chacun de ces sols (tableau 8, chap. II). Ils montrent aussi que le phosphore est mobile dans la plante et migre bien vers les grains.

L'évolution de l'absorption du phosphore par la plante diminue en fonction de l'âge ; elle est beaucoup plus importante au stade début de tallage qu'au stade floraison et encore plus qu'au stade maturation. La différence peut atteindre dix fois plus pour les tiges et les gaines dans le cas du sol de rendzine.

La fertilisation en manganèse a un effet négatif sur les teneurs des organes en phosphore ; cet effet n'est mis en évidence que pour les racines dans le cas du sol sur limon et du sol de rendzine et pour les limbes dans le cas du sol sur limon (tableau 73). L'influence de la fertilisation en bore est positive mais elle est rarement mise en évidence ; par contre, l'effet de l'apport simultané du bore et du manganèse est systématiquement mise en évidence (tableau 73).

---

* Le phosphore, dans les noeuds, n'a été dosé que dans le blé sur sol de rendzine.

Tableau 73 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la concentration du phosphore dans les différents organes du blé.

Sol	Elément apporté	Valeurs de F					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	15,89*	0,37	2,02	2,59	1,99	1,85
	B	3,11	0,63*	3,01	6,54	3,68	1,70
	Mn+B	41,55*	36,37*	85,19*	134,81*	66,34*	122,87*
Sol de rendzine	Mn	9,35*	2,82	3,76	13,81*	3,73	1,48
	B	2,45	0,73	2,80	19,28*	3,20	9,27*
	Mn+B	69,44*	341,35*	279,83*	19,29*	42,04*	108,24*
Sol sur alluvion	Mn	3,55	11,57	65,81	9,06	16,05	
	B	0,73	0,01	13,79	8,53	6,42	
	Mn+B	81,32*	32,58*	11,25*	29,63*	11,54*	

* F : significatif au niveau de 0,99.

Tableau 74 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du phosphore dans les différents organes du blé.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	B	-0,13	0,76*	0,23	0,75*	0,48*	-0,52*
	Mn	-0,58*	-0,023	-0,43*	-0,24	-0,31*	-0,23
Sol de rendzine	B	-0,001	-0,15	0,39*	0,68*	0,52*	-0,65*
	Mn	-0,39*	-0,64*	-0,51*	-0,33**	-0,48*	-0,30
Sol sur alluvion	B	-0,48	0,049	0,40	0,75*	0,53	
	Mn	-0,48*	-0,76*	-0,79*	-0,21	-0,63*	

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

Nous avons trouvé une corrélation négativement significative au niveau de 0,99 entre la fertilisation en manganèse et la concentration du phosphore dans tous les organes du blé cultivé sur sol de rendzine et sur sol sur alluvion, à l'exception des limbes pour le sol sur alluvion et les noeuds pour le sol de rendzine. Pour le blé cultivé sur sol sur limon, cette corrélation existe pour les racines, les gaines et les grains (tableau 74). Par contre, une corrélation positive et significative (au niveau de 0,99) est trouvée entre la fertilisation en bore et la concentration du phosphore dans les limbes pour les trois sols, dans les grains pour le sol sur limon et celui de rendzine (tableau 74) ; ce qui nous conduit à penser que le bore favorise la migration du phosphore vers les parties aériennes (limbes et grains).

Au moyen de l'analyse de régression, nous avons pu montrer une liaison positive entre la fertilisation en bore et l'accumulation du phosphore dans les limbes et une liaison négative entre la fertilisation en manganèse et l'accumulation du phosphore dans les limbes dans le cas des sols expérimentés (fig. 80 A, B et C).

1.4.2. Le potassium.

Le potassium ne s'accumule guère dans les racines qui, avec les grains, sont les organes les moins riches. Il migre vers les noeuds, limbes, gaines et tiges. Son accumulation est la plus importante dans les noeuds (4,16 % de matière sèche). L'accumulation du potassium dans les organes varie d'un sol à l'autre ; dans le sol sur limon, le blé prélève au total moins de potassium que celui dans les deux autres sols. Ceci est en accord avec la teneur du potassium dans le complexe absorbant (tableau 7, chap. II). Pour le blé du sol sur alluvion et celui du sol de rendzine, la différence entre les teneurs en potassium dans les limbes, les gaines et les tiges n'est pas importante (respectivement pour le blanc : 3,32 % - 3,43 % et 3,55 % de matière sèche (M.S.) pour le sol de rendzine et 3,52 % - 3,50 % et 3,83 % de M.S. pour le sol sur alluvion). Par contre, les grains sont beaucoup moins riches (0,50 % et 0,54 % de M.S. respectivement pour le sol de rendzine et le sol sur alluvion).

L'évolution des teneurs en potassium, en fonction des stades du développement, est décroissante pour les limbes, les gaines, les

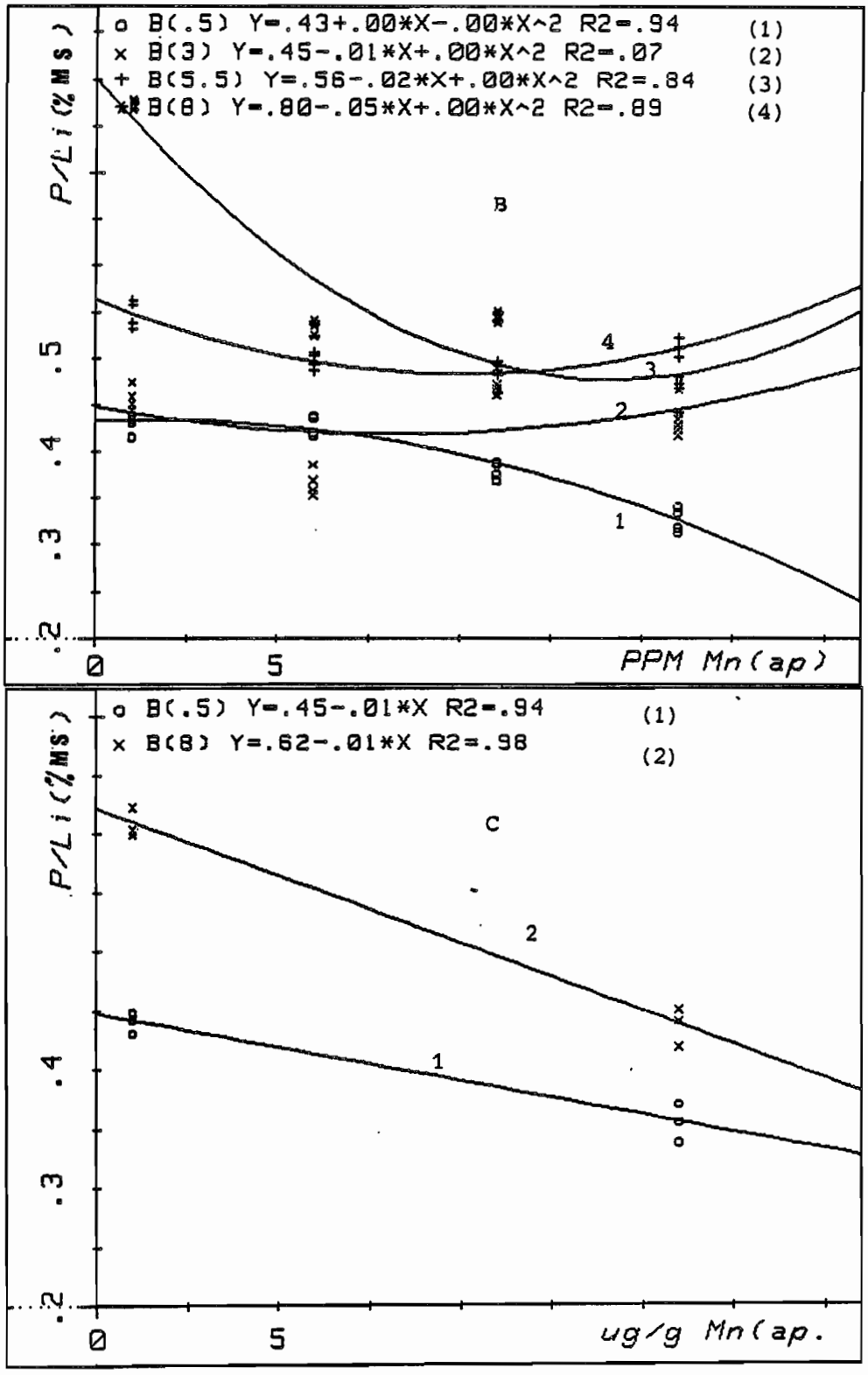


Figure 80 - B et C - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du phosphore dans les limbes du blé cultivé sur B - sol de rendzine (r) et C sol sur alluvion.

épis et les tiges, et croissante pour les racines ; ce qui pourrait traduire une migration secondaire. Cet ordre d'évolution ne varie pas sous l'influence des doses excessives de bore et de manganèse.

L'application excessive du manganèse a un effet négatif sur l'accumulation du potassium dans les racines et les grains ; cet effet varie d'un sol à l'autre : il n'est mis en évidence que pour le sol sur limon (tableau 75). Les tableaux 75 et 76 montrent que l'analyse de variance indique un effet significatif du manganèse sur la teneur en potassium dans les limbes pour le sol de rendzine et une corrélation positive et significative pour les trois sols. Nous avons trouvé également des corrélations positives et significatives entre l'application du manganèse et l'accumulation du potassium dans les limbes pour les trois sols et les gaines pour le sol sur alluvion et le sol de rendzine (tableau 76), pour lesquels les teneurs en potassium sont plus importantes que pour celle du sol sur limon. Nous avons mis en évidence un effet négatif du manganèse sur le potassium dans les noeuds (tableaux 75 et 76).

L'application du bore a un effet sur l'accumulation du potassium dans les racines ; il se traduit par une corrélation négative et significative dans les trois sols (tableau 75). Il en est de même pour les gaines dans le sol sur limon et le sol de rendzine. Cette corrélation est positive et significative pour le potassium dans les grains dans le cas du sol sur alluvion et le sol de rendzine.

L'analyse de régression a montré l'effet négatif du manganèse sur le potassium dans les grains et l'effet positif du bore sur le potassium dans les grains (fig. 81 A, B et C). Nous constatons que moins l'application du manganèse est forte, plus l'effet positif du bore est important et vice-versa : un R^2 très faible est trouvé en cas d'application de 16 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse (fig. 81 A).

Tableau 75 : Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la concentration du potassium dans les différents organes du blé.

Sol	Elément apporté	Valeurs de F					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	32,59*	0,80	0,73	1,32	7,49*	
	B	8,96*	0,48	4,06	1,11	2,20	
	Mn+B	12,28*	68,57*	55,76*	83,79*	29,28*	
Sol de rendzine	Mn	0,16	2,97	5,80	11,67*	3,46	23,60*
	B	2,08	1,12	6,47	2,75	1,82	1,23
	Mn+B	77,02*	133,83*	8,27*	15,47*	30,64*	7,21*
Sol sur alluvion	Mn	0,63	13,31	7,19	1,61	49,00	
	B	5,55	4,55	16,70	6,18	50,61	
	Mn+B	16,79*	4,73	5,45	11,44*	4,31	

* F : significatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 76 : Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du potassium dans les différents organes de blé.

Sol	Elément apporté	Coefficient de corrélation					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	B	-0,42*	0,20	-0,41*	-0,13	-0,056	
	Mn	-0,56*	-0,11	0,026	0,36*	-0,55*	
Sol de rendzine	B	-0,61*	-0,39*	-0,47*	-0,15	0,36*	0,099
	Mn	-0,012	-0,45*	0,50*	0,78*	-0,47*	-0,78*
Sol sur alluvion	B	-0,68*	0,62*	-0,091	-0,33	0,74*	
	Mn	-0,19	-0,18	0,64*	0,60*	-0,42	

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

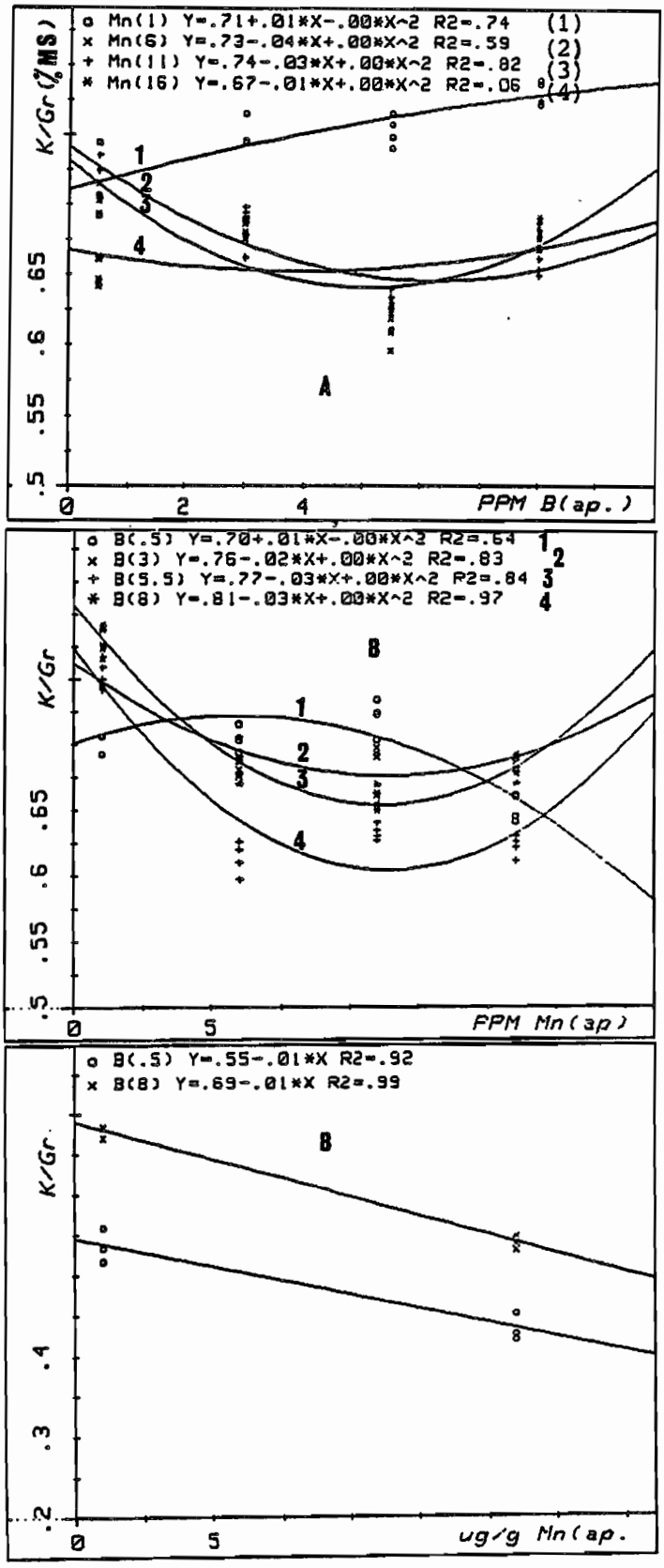


Figure 81 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et l'accumulation du potassium dans les grains. A et B sol sur limon, C - sol sur alluvion.

1.4.3. Le calcium

Cet élément migre bien vers les limbes où il est stocké, puisque, pour les trois sols, c'est dans cet organe que nous avons trouvé le plus de calcium (1,07 % de M.S. pour le sol sur limon, 1,30 % pour le sol de rendzine et 1,32 % pour le sol sur alluvion); ces teneurs sont en accord avec le calcium du complexe absorbant. Les résultats des concentrations du calcium dans les différents organes permettent de les classer dans l'ordre décroissant suivant: limbes > racines > gaines > tiges > noeuds > grains; cet ordre, en général, ne varie pas avec l'application excessive du bore ou du manganèse. Nous constatons donc que les grains sont pauvres en calcium par rapport aux autres organes; leur teneur dans le cas de fertilisation compléte Fc est de 0,050 % de M.S. pour le sol sur limon, de 0,039 % de M.S. pour le sol de rendzine et de 0,053 % de M.S. pour le sol sur alluvion . L'apport du bore et du manganèse en doses estimées optimales augmente relativement, l'absorption du calcium surtout pour le sol sur limon. L'évolution de la concentration du calcium dans les différents organes en fonction de l'âge est décroissante , elle décroît moins pour les limbes du stade floraison à la maturation par rapport au stade début de tallage, pour lequel les limbes en sont beaucoup moins riches. Dans les racines, la teneur du calcium augmente jusqu'au stade floraison pour décroître en suite.
Pour les gaines cette teneur est pratiquement stable pour le stade début de tallage et floraison, elle augmente ensuite notamment dans le cas du sol de rendzine.

L'analyse de variance et le coefficient de corrélation, ont montré un effet négatif et significatif de la fertilisation excessive en manganèse sur la concentration du calcium dans les racines pour le sol sur limon; il en est de même pour les noeuds dans le cas du sol de rendzine (tableaux 77 et 78). Une influence positive du manganèse sur la concentration du calcium dans les grains a été décelée pour le sol sur alluvion.

Une corrélation négative et significative est trouvée pour les trois sols, entre l'application du bore et l'accumulation du calcium dans les limbes (tableau 77). Par contre des corrélations positives et significatives au niveau de 0,99 sont trouvées pour les gaines et les tiges des blés cultivés sur l'un ou l'autre des trois sols (tableau 77).

Tableau 77 - Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur le concentration du calcium dans les différents organes de blé.

Sol	Fertilisant	Valeur en F.					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	13,61*	1,37	2,00	0,27	0,44	
	B	3,77	3,71	1,52	8,88*	0,64	
	Mn + B	46,71*	70,61*	57,38*	25,62	1,17	
Sol de rendzine	Mn	0,75	2,99	1,57	1,59	0,76	20,30*
	B	4,12	3,91	4,84	4,56	1,24	3,78
	Mn + B	277,34*	48,65*	175,56*	47,93*	1,03	36,89*
Sol sur alluvion	Mn	0,14	0,36	345,34*	0,03	341,02*	
	B	1,49	2,37	242,84*	22,19	869,59*	
	Mn + B	117,24*	36,11*	0,23	9,53*	0,73	

* F Significatif au niveau de probabilité 0,95.

Tableau 78 - Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du potassium dans les différents organes de blé.

Sol	Fertilisant	Coefficient de corrélation					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon.	Mn	- 0,77 *	- 0,15	- 0,15	0,071	0,085	
	B	0,14	0,68*	0,53	- 0,58*	0,094	
Sol de rendzine	Mn	0,049	- 0,38*	- 0,13	- 0,42*	0,066	- 0,78*
	B	- 0,63 *	0,60*	0,65*	- 0,72*	- 0,15	0,22
Sol sur alluvion	Mn	0,30	0,12	- 0,28	- 0,025	0,54	
	B	- 0,54	0,81*	0,71*	- 0,85*	- 0,066	

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

L'application simultanée du bore et du manganèse apportés a toujours, selon l'analyse de variance, une influence significative sauf dans le cas des grains pour les trois sols (tableau 76). Les courbes de régression (fig. 82 - A et B) montrent l'effet de l'apport du bore et du manganèse sur la concentration du calcium dans les grains. Il ressort que le manganèse en excès diminue l'effet du bore. Nous observons aussi que l'effet du bore et du manganèse, lorsqu'ils sont appliqués ensemble, n'est pas additif.

1.4.4. Le magnésium

Le blé prélève au total moins de magnésium que les autres macroéléments. Parmi tous les organes, ce sont les limbes qui en accumulent le plus tandis que les racines en accumulent le moins. La concentration des organes du blé en magnésium varie selon le sol; au total le blé cultivé sur sol de rendzine absorbe plus de magnésium que celui sur sol sur alluvion et encore plus que celui sur sol sur limon; il est important de souligner la concordance entre ce résultat et les teneurs en magnésium du complexe absorbant des sols (tableau 7 chapitre II).
Pour le blé cultivé sur les sols de rendzine et sur alluvion, les racines accumulent plus de magnésium (respectivement dans le cas de FC : 0,44% et 0,39 % de M.S.) que dans le cas du sol sur limon (0,046 % de M.S.) ; par contre la différence des concentrations de limbes est beaucoup moins importante (respectivement 0,33%, 0,31, et 0,32% de M.S). Les grains sont moins riches et les différences parmi les sols sont minimes (respectivement : 0,18%, 0,14% et 0,18% de M.S); quant aux tiges et noeuds (sol de rendzine), ils sont respectivement moins riches que les autres organes.

Les limbes accumulent plus de magnésium au stade floraison qu'au stade maturation et encore plus qu'au stade début de tallage. Pour les racines et les gaines les teneurs sont pratiquement stables d'un stade à l'autre, ainsi que pour les épis et les tiges. Ce qui nous laisse penser que l'absorption du magnésium par le blé est relativement stable et que le blé pourrait avoir un besoin continuel pendant tout son cycle de développement.

L'influence d'une application excessive du magnèsium n'est pas mis en évidence (tableau 79); par contre une influence significative d'une application excessive du bore sur la teneur des racines et des

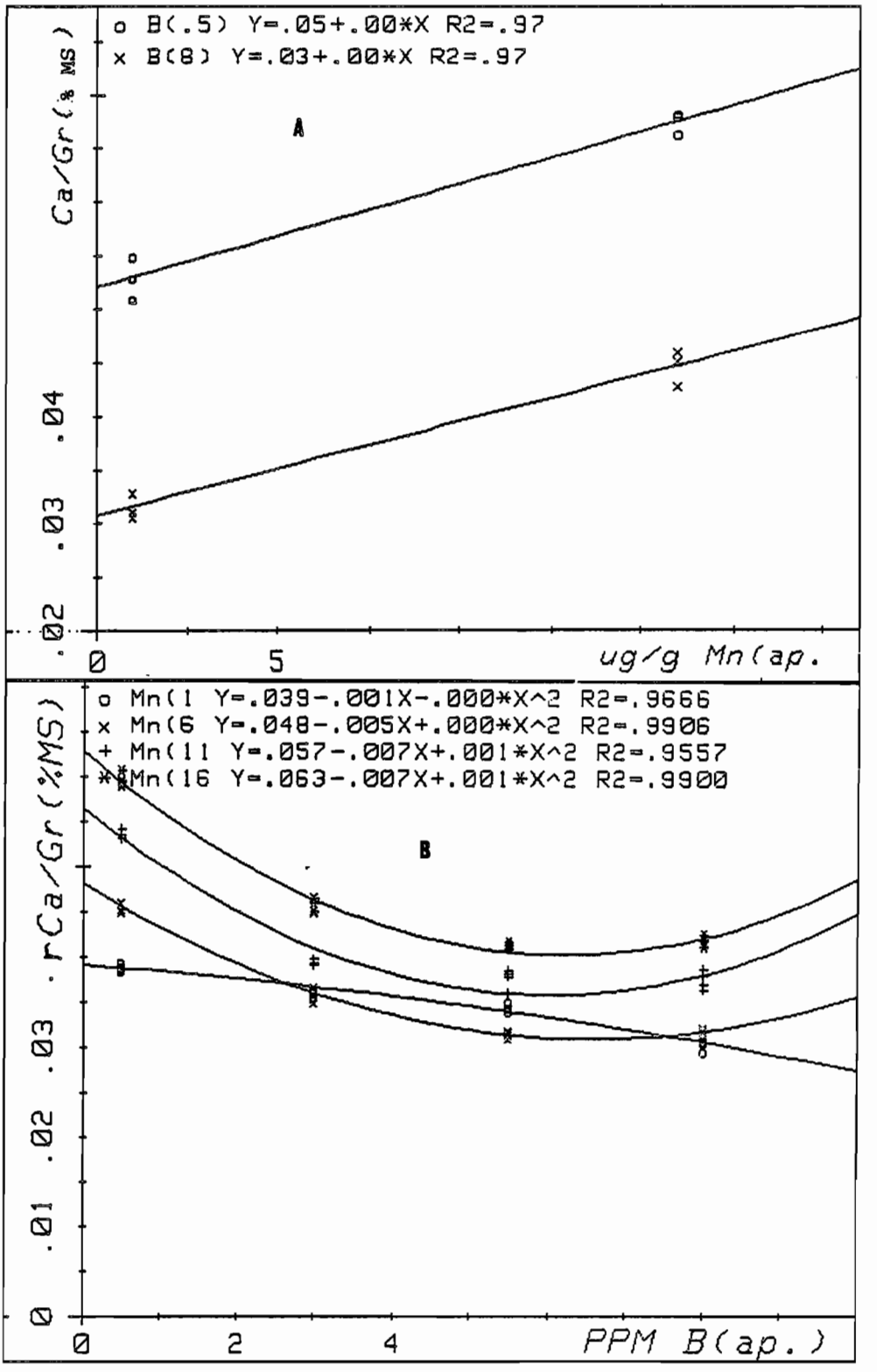


Figure 82 - Liaision entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du calcium dans les grains
A - sol sur alluvion. B - sol de rendzine (r).

Tableau 79 - Influence de la fertilisation en bore et en manganèse sur la concentration du magnésium dans les différents organes de blé.

Sol	Fertilisants	Valeur en F.					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	2,63	2,14	1,01	0,72	1,94	
	B	9,25*	1,71	0,37	1,18	8,57*	
	Mn + B	61,68*	51,96*	53,10*	76,34*	52,76	
Sol de rendzine	Mn	2,36	1,84	2,55	4,04	4,79	1,76
	B	6,48	9,27*	4,06	23,41*	0,62	3,34
	Mn + B	87,46*	161,46*	117,83*	70,84	83,29	98,13*
Sol sur alluvion	Mn	0,58	2,63	4,15	7,46	0,45	
	B	2,06	3,21	0,02	7,69	0,67	
	Mn + B	162,84*	58,21	53,45	80,57*	570,78*	

* F : Signicatif au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 80 - Corrélation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du magnésium dans les différents organes de blé.

Sol	Fertilisant	Coefficient de corrélation					
		Racines	Tiges	Gaines	Limbes	Grains	Noeuds
Sol sur limon	Mn	- 0,29	- 0,072	- 0,24	- 0,094	- 0,21	
	B	0,80*	0,43*	0,19	0,15	0,74*	
Sol de rendzine	Mn	- 0,26	- 0,30	0,051	- 0,11	- 0,021	- 0,40*
	B	0,67*	0,72*	0,46*	0,88*	0,34*	0,65*
Sol sur alluvion	Mn	- 0,26	- 0,61	- 0,47	- 0,35	0,001	
	B	- 0,57	0,67*	0,27	0,75*	0,61*	

* significatif au niveau de probabilité 0,99.

grains en magnésium est apparait dans le sol sur limon. L'application simultanée du bore et du manganèse a un effet significatif systématique sur les concentrations en magnésium dans les différents organes.

Aucune corrélation n'est décelée entre l'application du manganèse et les concentrations en magnésium des différents organes (tableau 80). Des corrélations positives et significatives sont montrées entre l'apport en excès du bore et les teneurs en magnésium dans tous les organes du blé cultivé sur sol de rendzine, dans les racines, les tiges et les grains pour le sol sur limon. Des corrélations positives et significatives sont trouvées également dans le cas des tiges,des limbes et des grains pour le sol sur alluvion.

Les courbes de régression (fig. 83 et A et B), montrent l'effet du bore en excès sur l'augmentation du magnésium dans les grains et le faible effet du manganèse en excès sur la baisse du magnésium dans cet organe.

VIII_2 - FIXATION DES OLIGOELEMENTS APPORTES AUX SOLS.

A la fin de la première expérience, nous avons dosé le bore et le manganèse dans la terre des pots. Le but de ce dosage était d'essayer de connaitre la quantité des éléments restant fixés aux sols et que les plantes n'ont pas absorbés. Ce dosage est destiné en outre à comprendre le comportement du bore et du manganèse dans les sols cultivés. Cette approche nous semble nécessaire pour mieux cerner le concept de fertilité des sols. Le dosage est effectué comme nous l'avons expliqué au chapitre IV.

2.1. Bore

Les résultats de dosage du bore dans les sols après culture sont consignés dans le tableau 81. Deux remarques principales se dégagent: 1 - une action antagoniste existe entre l'apport du bore et celui du manganèse, le bore extrait à l'eau étant plus faible en présence des différentes doses de manganèse. 2 - Une relation entre le bore extrait à l'eau après la récolte et celui prélevé par les plantes est montrée; ces deux valeurs vont dans le même sens.

Le dosage du bore permet de souligner une fixation impor-

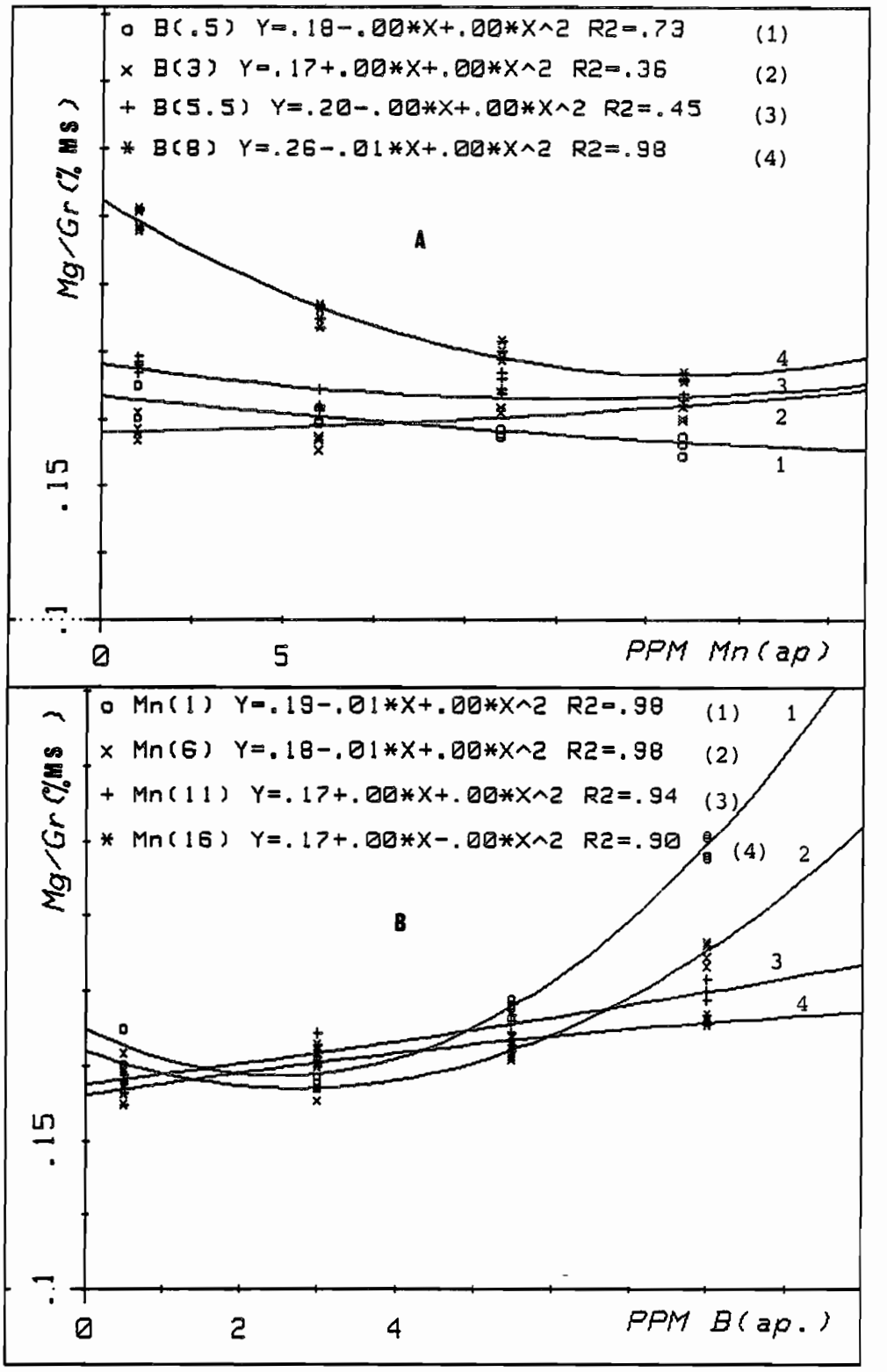


Figure 83 - Relation entre la fertilisation en bore et en manganèse et la concentration du magnésium dans les grains.
A - en fonction du manganèse , B - en fonction du bore.

Tableau 81 - Teneur en bore (extrait à l'eau bouillante) et en manganèse (extrait à Hcl 0,1N) dans les sols après la récolte lors des différents traitements de la première expérience.

Traitements	Moyennes ($\mu g.g^{-1}$)				Ecarts-type				C.V. %			
	B		Mn		B		Mn		B		Mn	
	S.L.*	S.R*	S.L.	S.R	S.L.	S.R	S.L	S.R	S.L	S.R	S.L	S.R
F N S	0,31	0,26	75,8	58,7	0,02	0,01	1,13	0,98	5,70	2.72	1,49	1,66
F C	0,45	0,37	76,0	60,3	0,01	0,01	0,07	0,88	1,57	3,82	0,09	1,47
6ppm de Mn	0,51	0,41	82,8	64,0	0,01	0,01	1,06	0,99	2,77	3,45	1,28	1,55
11ppm de Mn	0,34	0,30	86,0	68,4	0,01	0,01	0,71	1,94	4,16	3,54	0,83	2,84
16ppm de Mn	0,31	0,22	91,2	73,4	0,01	0,02	0,99	2,51	4,56	8,04	1,09	3,47
3ppm de B	1,09	0,93	70,5	55,0	0,05	0,06	1,41	0,86	4,22	6,08	2,01	1,57
5,5ppm de B	2,50	2,04	69,5	51,9	0,14	0,04	1,77	1,41	5,66	1,73	2,54	2,72
8 ppm de B	3,90	3,20	68,8	56,3	0,21	0,14	1,70	2,21	5,44	4,42	2,47	3,92
6ppm de Mn et 3ppm de B	0,70	0,59	80,8	64,0	0,01	0,01	1,06	0,45	1,99	1,20	1,31	1,70
11ppm de Mn et 3ppm de B	0,59	0,61	82,3	66,6	0,01	0,01	1,06	0,27	2,40	2,32	1,29	0,40

16ppm de Mn et 3ppm de B	0,61	0,49	90,6	73,2	0,04	0,02	1,24	1,50	5,80	4,33	1,37	2,05
6ppm de Mn et 5,5ppm de B	0,97	0,69	76,2	62,0	0,06	0,09	2,40	2,21	6,56	12,81	3,16	3,56
6ppm de Mn et 8ppm de B	3,58	3,10	76,8	61,0	0,18	0,07	1,06	0,39	4,94	2,28	1,38	0,64
11ppm de Mn et 5,5ppm de B	2,17	1,65	82,5	65,9	0,05	0,07	2,47	1,13	2,28	4,29	3,00	1,72
11ppm de Mn et 8ppm de B	2,88	2,35	81,7	66,2	0,18	0,14	1,70	1,33	6,14	6,02	2,08	2,02
16ppm de Mn et 5,5ppm de B	1,71	1,30	78,5	69,1	0,06	0,07	2,12	1,05	3,31	5,44	2,70	1,52
16ppm de Mn et 8ppm de B	1,63	1,29	82,4	66,6	0,10	0,11	3,36	0,26	6,07	8,22	4,08	0,39

* S.L : sol sur limon. S.R : sol de rendzine.

tante du bore ajouté par le sol car les quantités du bore extrait avant et après la culture et celles prélevées sont loin de la quantité totale ajoutée; dans le cas d'un apport de 8 µg.g^{-1} du bore on extrait 3,9 µg.g^{-1} du sol sur limon et 3,2 µg.g^{-1} du sol de rendzine, comme la quantité prélevée par les plantes, elle est également beaucoup moins importante; même en présence d'apport simultané de 8 µg.g^{-1} et de 16 µg.g^{-1} de manganèse (tableau 81), ce qui est en accord avec les résultats de l'élution du bore (chap. V).

Tenant compte des valeurs respectives en bore extractible à l'eau dans les deux sols avant la culture et des quantités absorbées par les plantes dans les deux cas, les résultats montrent aussi que le sol de rendzine retient plus de bore que celui sur limon.

2.2. Manganèse

Les résultats de dosage du manganèse extrait à l'acide chlorhydrique 0,1 N sont donnés dans le tableau 81. Les mêmes remarques dégagées pour le bore s'imposent ici quant à l'existence d'une action antagoniste entre le bore et le manganèse. Le manganèse extrait étant plus faible en présence des différentes doses du bore, il est d'autant plus faible que la dose du bore est plus élevée. Le manganèse extrait va dans le même sens que celui prélevé par les plantes; lorsque les plantes prélèvent moins de manganèse, l'acide chlorhydrique 0,1N en solubilise moins, ce qui montre une rétention plus forte du manganèse apporté au sol sous l'effet antagoniste du bore apporté. Ce résultat est intéressant car il va dans le même sens que cas précédents obtenus par l'absorption du manganèse par les plantes.

Le sol de rendzine, comme pour le bore, retient plus du manganèse que celui sur limon, l'extraction du manganèse étant plus faible dans le premier que dans le deuxième ce que nous avons trouvé par l'étude du prélèvement et l'accumulation dans les plantes.

Le dosage du manganèse montre une fixation importante du manganèse apporté par le sol, plus importante que celle du bore. Dans le cas d'apport de 16 µg.g^{-1} du manganèse, l'acide chlorhydrique 0,1N extrait après la récolte 82% du manganèse ajouté au sol sur limon et 71 % du manganèse ajouté au sol de rendzine. Cette extraction est beaucoup moins importante en présence du bore notamment de 8 µg.g^{-1} de bore

(tableau 81), ce qui va dans le même sens que le prélèvement et l'accumulation du manganèse par les plantes moins importants dans ce cas. Ainsi le comportement du manganèse est différent selon que l'on apporte ou non du bore et vice-versa.

VII - 3 - INTERPRETATION

La fertilité excessive en bore et manganèse se répercute, non seulement, sur l'absorption de ces deux éléments mais souvent aussi sur celle d'autres éléments par l'effet d'antagonisme ou de synergie. Il peut même arriver qu'un élément agisse sur la répartition des autres éléments entre les différents organes de la plante. L'étude que nous avons faite va nous en fournir plusieurs exemples.

3.1. Prélèvement, migration et accumulation du bore et effet du bore et du manganèse apportés.

Les résultats de l'analyse des plantes ont montré que le prélèvement du bore par les plantes, tout en augmentant d'une façon significative, n'était pas proportionnel à l'augmentation de sa concentration dans le sol; le dosage de cet élément dans le sol après la récolte l'a confirmé. On pourrait penser à une rétention importante du bore par le sol, notamment celui de rendzine et celui sur alluvion dont les plantes absorbent moins de bore; nous soulignons que ces deux sols ont un pH plus élevé et des teneurs en argile et en limon fin plus fortes que le sol sur limon. Cela peut expliquer la toxicité plus accentuée du bore dans ce sol que dans les deux autres sur tous les plans (symptômologie, production de biomasse, concentration en bore...). GUPTA et MACLEOD (1981) ont trouvé également que le chaulage de sol podzolique en augmentant son pH faisait baisser les teneurs en bore de l'orge. GUPTA (1979) a aussi souligné l'importance du pH et du calcium dans l'absorption du bore. Les résultats obtenus par les auteurs sur la rétention du bore par les sols sont variables (EL-RACHI DI et O'CONNOR, 1982).

Les racines de blé accumulent 137,3 $\mu g.g^{-1}$ de bore lorsque une dose de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ est appliquée au sol de rendzine à pH=7,9. YADAV et MANHANDA (1979) ont trouvé des résultats voisins; ils ont dosé 161,7 $\mu g.g^{-1}$ de bore dans les racines de blé cultivé sur sol sableux

non calcaire à pH = 8,2 ayant reçu 6 $\mu g.g^{-1}$ de bore. Ils ont souligné, comme nous, une baisse importante de bore dans les racines au stade maturation.

Nous avons trouvé une relation significative entre l'application du bore et l'augmentation de sa teneur dans les différents organes notamment les grains. Les noeuds se distinguent des entre-noeuds par une teneur en bore de la matière sèche environ une fois et demi plus élevée, ce résultat rejoint ceux obtenus par COIC et al., (1982) pour les macro-éléments dans des graminées.

Un autre résultat nous parait intéressant, c'est la variation très importante de l'accumulation du bore d'un organe à l'autre. Cette variation se trouve modifiée sous l'effet des doses excessives du bore apporté : les limbes deviennent les plus riches sous l'effet de la concentration (JARRELL et BEVERLLY 1982). Dans cette étude nous avons trouvé qu'en fait les limbes étaient les plus riches en présence d'un apport de 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore, tandis que les racines l'étaient pour un apport de 0,5 $\mu g.g^{-1}$; on pourrait penser qu'à partir de certaines doses, (5,5 $\mu g.g^{-1}$ pour ce travail), la toxicité en bore des racines perturbe, la régulation de son absorption par ces dernières ainsi que sa répartition dans les divers organes, à ce niveau le manganèse ne semble pas intervenir; cette modification n'étant pas affectée par cet élément. La variation de la répartition de bore dans les organes est fonction des doses apportées (BERRY et WALLACE, 1981). BINGHAM et GARBER (1970), ont trouvé qu'un apport de 10 $\mu g.g^{-1}$ de bore ne réduit que faiblement le rendement du maïs, mais un apport de 20 $\mu g.g^{-1}$ ou de 40$\mu g.g^{-1}$ le réduit d'une façon significative et augmente les teneurs en bore des feuilles respectivement à 800 $\mu g.g^{-1}$ et 1300 $\mu g.g^{-1}$. Les racines absorbent plus du bore, notamment en présence d'excès de bore, au stade début de tallage et au stade floraison qu'au stade maturation; il en est de même pour les limbes et les grains. Ceci ne peut pas être dissocié de l'augmentation du poids de matière sèche en fonction du stade de développement, élément qui se répercute sur la concentration du bore comme aussi d'autres éléments dans ces organes (THOMAS et MATHER, 1979). YLARANTA et al., (1979) ont trouvé que la concentration de blé en bore était élevée au début de la saison de la croissance et décroissait par la suite. En fait, il est assez difficile de distinguer les effets des changements saisonniers de ceux dûs au stade de la croissance. Nous avons noté éga-

lement que la diminution des concentrations de bore dans la plante était plus importante entre le stade début de tallage et le stade floraison, qu'entre ce dernier et la maturation; COIC et TENDILLE (1971) avaient signalé, qu'en général les plantes et particulièrement les graminées de prairie voyaient baisser leur teneur en oligoéléments en passant du stade herbacé à la floraison, la baisse était d'abord rapide puis plus lente. Cette diminution de la concentration de bore n'est pas dûe à l'épuisement de ressource de bore dans le sol; l'extraction d'eau ayant montré la présence d'une portion importante de bore ajouté dans la solution du sol dans lequel le bore circulerait librement vers les racines (WILKINSON, 1979); il nous semble plausible de penser, qu'elle serait probablement dûe, en partie, à une modification de la régulation et de la capacité d'absorption de bore par les racines et aussi à une éventuelle migration secondaire des parties aériennes vers les racines et à sa désorption par les racines dans la solution du sol. En outre cette migration secondaire serait à l'origine de la teneur relativement plus forte de bore dans les tiges au stade de maturation qu'au stade floraison. A partir des teneurs en bore dans les différents organes et leur production de matière sèche nous avons trouvé une baisse des teneurs en cet élément avec l'augmentation du rendement et réciproquement (fig. 84 A et B). Ce résultat est important, lorsqu'on cherche la baisse du rendement à partir des teneurs dosées dans les tissus des plantes et vice-versa (ALVA et BILLE, 1981; FALESET OHKI, 1982; OHKI, 1984). on peut voir aussi l'effet de l'accumulation de la matière sèche sur la teneur en bore.

Les résultats des teneurs en bore des différents organes, reliés à la production de la matière sèche (Chap. VII), nous permettent de distinguer trois réponses de la plante à la présence de bore dans le milieu (à laquelle d'ailleurs ces réponses sont étroitement liées) :

1 - Une augmentation de rendement de blé et des teneurs en présence de 0,5 $\mu g.g^{-1}$ par rapport à l'absence de fertilisation en bore,
2 - Une faible baisse de rendement accompagnée d'une faible augmentation des teneurs pour l'ajout de 3 $\mu g.g^{-1}$ de bore.
3 - Une forte baisse du rendement accompagnée d'une forte augmentation des teneurs pour l'ajout de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ et plus encore pour l'ajout de 8 $\mu g.g^{-1}$ de bore.

A A

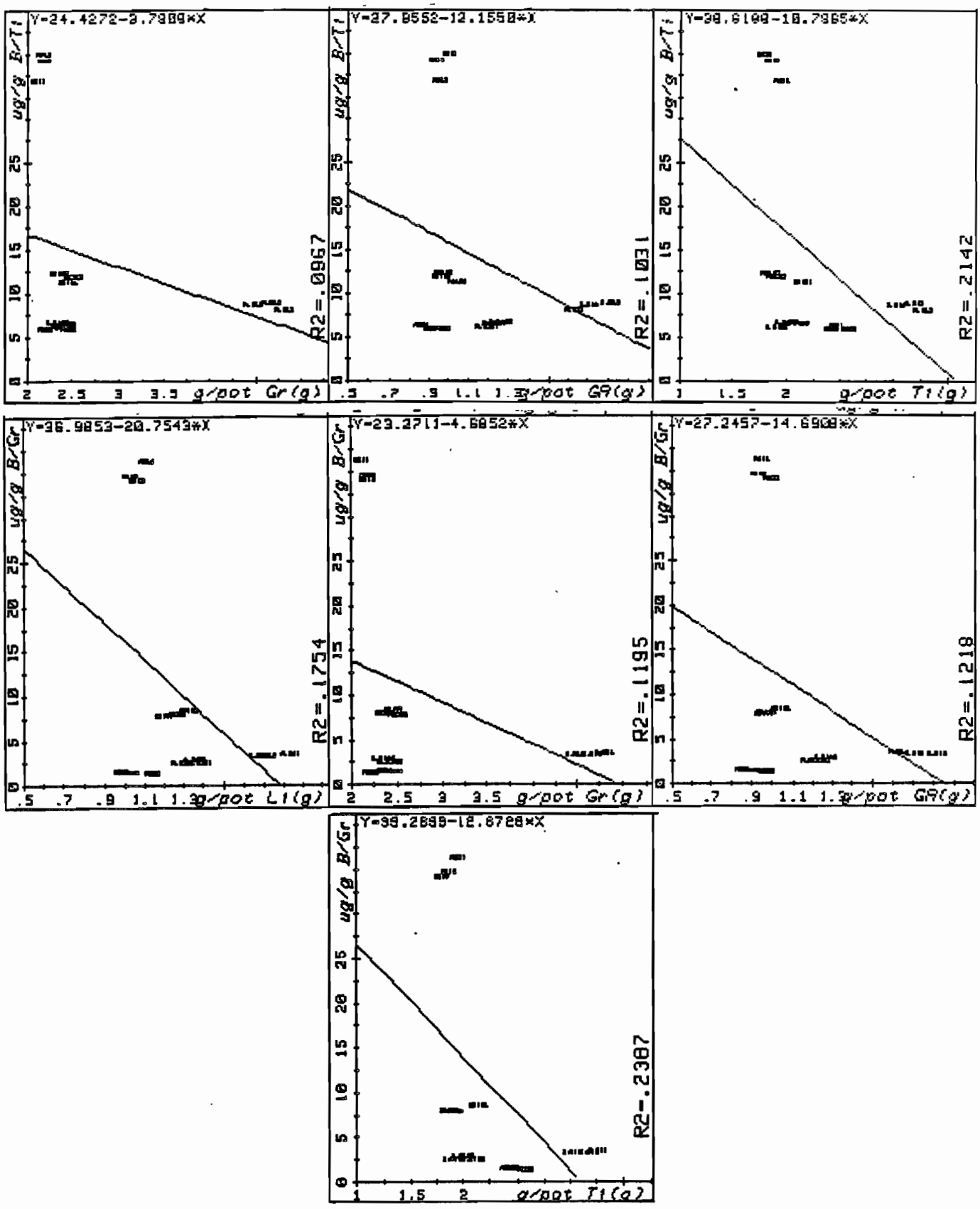
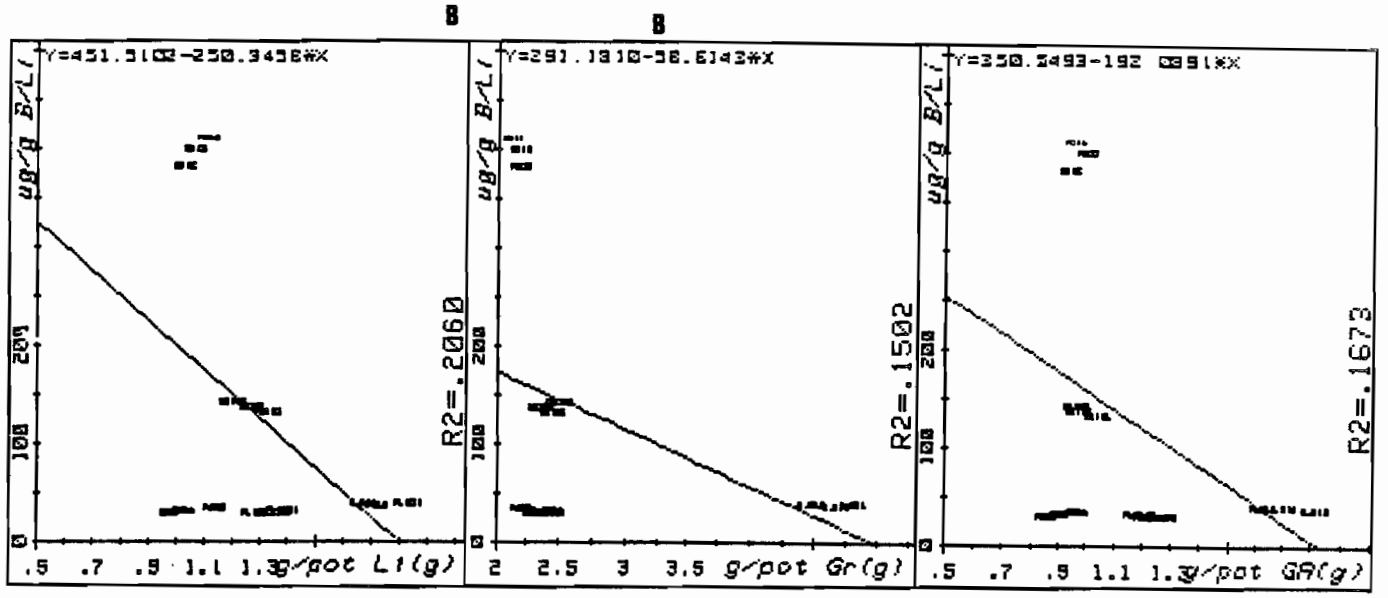
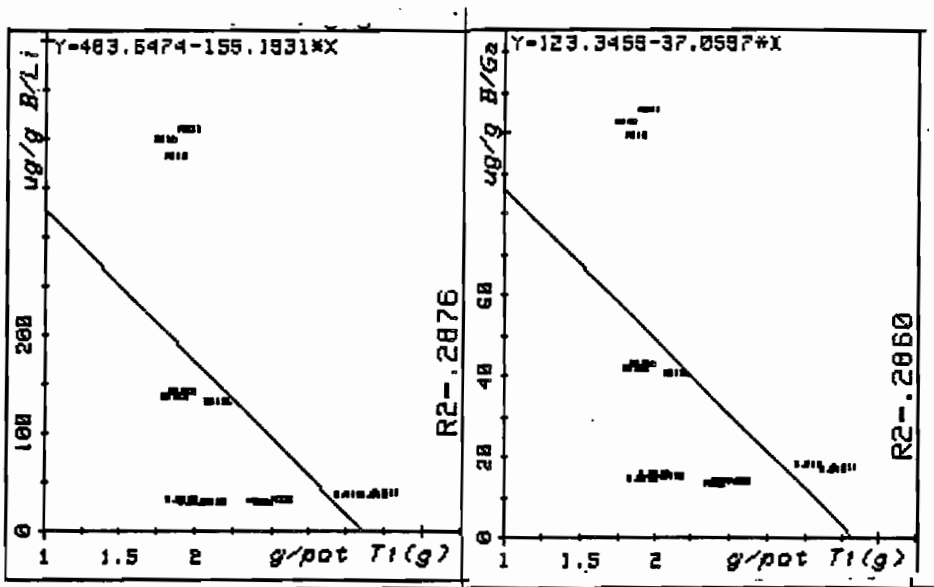
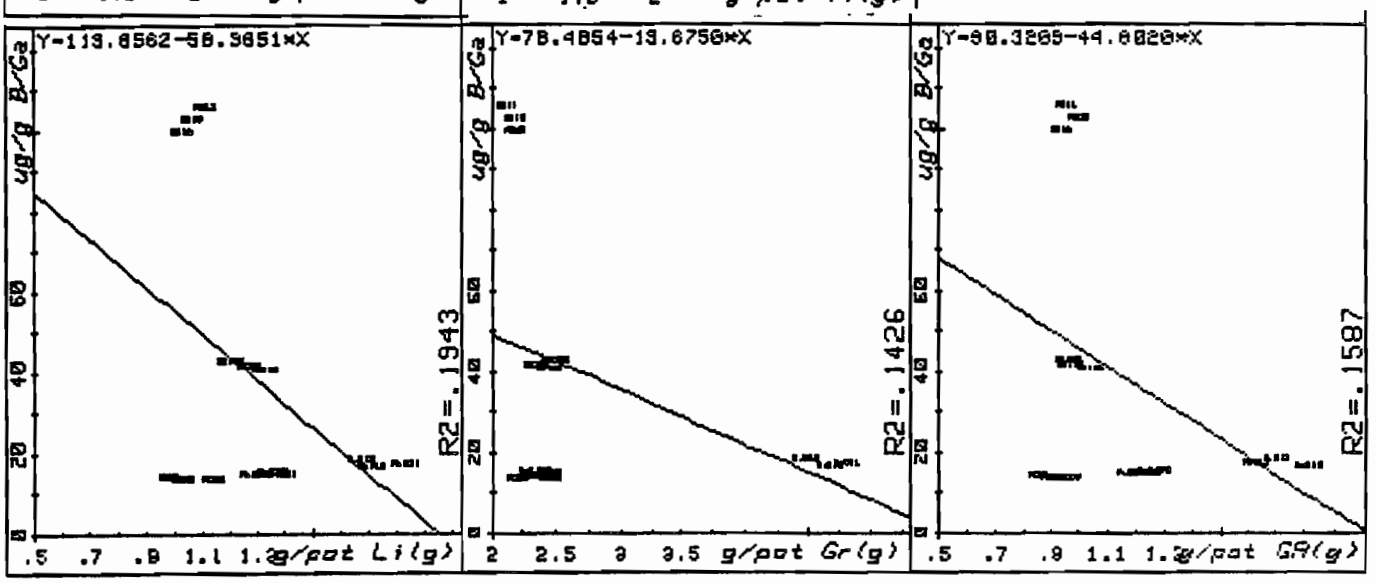


Figure 84 A et B-relation entre les teneurs en B des différents organes du blé cultivé sur sol sur alluvion et leur production de matière sèche.


B
B
Y=451.5102-250.3458*X
ug/g B/Li
g/pot Li(g)
R2=.2060
Y=291.1810-58.6142*X
ug/g B/Li
g/pot Gr(g)
R2=.1502
Y=350.5493-192.0891*X
ug/g B/Li
g/pot GA(g)
R2=.1673


Y=403.6474-155.1931*X
ug/g B/Li
g/pot Ti(g)
R2=.2076
Y=123.3458-37.0597*X
ug/g B/Ga
g/pot Ti(g)
R2=.2060


Y=113.6562-58.3651*X
ug/g B/Ga
g/pot Li(g)
R2=.1943
Y=78.4854-13.6750*X
ug/g B/Ga
g/pot Gr(g)
R2=.1426
Y=80.3265-44.8020*X
ug/g B/Ga
g/pot GA(g)
R2=.1587

De ces trois réponses de la plante on pourrait déduire, pour le cas des sols étudiés :

1 - la dose 0,5 $\mu g.g^{-1}$ correspond à une dose optimale pour la culture de blé.

2 - La dose 3 $\mu g.g^{-1}$ correspond à une dose de seuil de toxicité.

3 - l'ajout de 5,5 $\mu g.g^{-1}$ et 8 $\mu g.g^{-1}$ correspond à des doses très toxiques. Il importe de souligner que cette interprétation résulte de la présence dans cette étude des traitements avec ajout uniquement de bore car le manganèse, comme nous l'avons vu, est antagoniste du bore; selon BERRY et WALLACE (1981), un élément devient toxique lorsqu'une augmentation de dose appliquée provoque une baisse de rendement, sans qu'un autre élément n'intervienne qui puisse être la raison de cette baisse.

L'interaction de manganèse sur l'effet du bore, montrée dans les traitements d'apport simultané du bore et du manganèse, souligne l'importance de celle-ci dans la nutrition de blé en ces deux éléments. En fait nous avons trouvé que l'apport du manganèse réduit l'accumulation du bore dans les différents organes de blé et provoque une diminution dans l'extraction du bore à l'eau; ceci permettrait de penser que l'interaction pourrait se produire dans le sol par une compétition du bore et du mangèse au niveau d'absorption par les racines. L'effet négatif du manganèse sur l'extraction du bore est peu étudié, mais d'une manière générale, BUSSLER (1981) a souligné qu'un élément peut être antagoniste d'un autre par précipitation chimique.

Les trois doses correspondent aux teneurs suivantes des limbes en bore au stade maturation pour le sol sur limon:

1 - La dose optimale correspond à 82 $\mu g.g^{-1}$.

2 - Le seuil de toxicité correspond à 140 $\mu g.g^{-1}$.

3 - Les doses très toxiques à 1150 $\mu g.g^{-1}$. NIELSON et FRIIS - NIELSON (1976) ainsi qu'ALVA et BILLE (1981) ont essayé de développer une méthode de diagnostic pour d'autres éléments dans les céréales basée sur l'analyse des plantes. D'autres auteurs l'on fait pour d'autres plantes (HILL et MORILL, 1974).

3.2 - Prélèvement, migration et accumulation du manganèse et effet du manganèse et du bore apportés.

Les résultats d'analyse des plantes montrent une absorption significativement croissante du manganèse par le blé, mais non proportionnelle à la dose apportée au sol. L'extraction du manganèse à l'acide chlorhydrique 0,1 N après la récolte, est en relation étroite avec le manganèse apporté, ce qui signifie que le prélèvement par les plantes, tout en étant dans le même sens que cette extraction, n'est pas en relation étroite avec elle. FOY (1983) n'a pas trouvé de relation étroite entre les teneurs en manganèse des plantes et son extraction par plusieurs réactifs.

Les plantes absorbent moins de manganèse lorssqu'elles sont cultivées sur sol de rendzine et encore moins sur sol sur alluvion que celles sur sol sur limon; d'où la toxicité de cet élément, pour la culture de blé, est ainsi plus accentuée pour ce dernier sol. Cette absorption qui se fait par la diffusion et le "mass-flow" (WILKINSON, 1972), est en relation avec le pH des sols qui influence d'ailleurs l'extraction du manganèse par l'acide chlorhydrique comme nous l'avons montré avant culture au chapitre IV et après la récolte dans ce chapitre (VIII). Ainsi on voit la nécessité de recherches pour trouver des genotypes spécifiques correspondant aux caractéristiques de chaque sol et à sa fertilité naturelle spécifique. SWARUP (1982) a montré que le chaulage de certains sols sodiques réduit l'absorption du manganèse par le riz, par suite d'augmentation de pH de ces sols. PATIL et PATIL l'ont souligné également pour le maïs cultivé sur sol argilo-limoneux, et ont conseillé l'ajout de fumure organique qui fournit des agents chelatants maintenant le manganèse et d'autres oligoéléments sous forme soluble.

Comme nous l'avons montré, l'absorption du manganèse ne dépend pas uniquement de la dose apportée mais également de plusieurs paramètres tels que les différentes caractéristiques du sol; d'autre part cette absorption dépend aussi des propriétés fondamentales de manganèse, distingué par le fait qu'il est un élément de transition dont la caractéristique principale (commune à tous les éléments de transition tels que le cuivre, le zinc et le fer pour cette étude) repose sur l'existence, au sein de leur atome, d'une couche électronique profonde incomplètement saturée, c'est-à-dire, possédant un nombre d'électrons différent

de celui nécessaire à l'acquisition d'une configuration stable. Le manganèse constitue ainsi un véritable piège pour les donneurs d'électrons avec lesquels il forme des complexes extrêmement stables (NALOVIC,1977). Plus le pH est élevé, plus la solution du sol est riche en (oH^-) et le manganèse, fortement adsorbé au sol et par les oxydes de fer et donc difficilement absorbé par les plantes (KRAUSKOPF, 1972), ce qui pourrait expliquer en partie son absorption moins importante sur sol de rendzine et sur sol alluvion que celui sur limon de pH plus faible.

Les teneurs en manganèse varient d'une manière importante d'un organe à l'autre; les limbes accumulent pour tous les traitements le plus de manganèse et leur enrichissement est fonction des doses apportées. Les noeuds sont avec les tiges les moins riches; COEC et al., (1982) ont montré un fait analogue pour les macro-éléments. L'enrichissement des organes en fonction des doses varie d'un organe à l'autre, mais l'analyse de variance ne montre pas de relation significative. Néanmoins, pour la dose 16 $\mu g.g^{-1}$, l'enrichissement parait brusquement beaucoup plus important que pour les doses plus faibles; on pourrait penser à une éventuelle perturbation de la régulation physiologique de l'absorption du manganèse. Même avec cet enrichissement le taux de manganèse calculé comme absorbé est très faible (les 2,1 % du manganèse extrait par l'acide chlorgydrique 0,1 N plus celui ajouté dans le cas du sol sol sur limon par exemple, sont plus proches du manganèse extrait à l'eau (chap. V)). ABADIA et al., 1982, ont trouvé que ce taux est de 1,0%, ils ont montré aussi une augmentation des teneurs en manganèse dans la luzerne plus importante au-delà de 75 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse appliquée au sol calcaire, cette augmentation devient linéaire au delà d'une application de 200 $\mu g.g^{-1}$. L'enrichissement plus important dans les différents organes de blé avec la dose de 16 $\mu g.g^{-1}$ de manganèse, ne peut être dissocié de la réduction la plus importante de la matière sèche enregistrée pour cette dose dans les trois sols exprimentés (chapitre VII); les teneurs étant exprimées par rapport à la matière sèche.

Il existe une variation dans l'accumulation du manganèse en fonction du stade du développement; tous les organes sauf les tiges contiennent moins de manganèse au stade maturation qu'au stade floraison; la différence est moins importante que celle observée dans le cas du bore, et serait comme pour le bore en relation avec l'accumulation de la matière sèche à la maturation. YLARANTA et al., (1979) ont constaté une légère

décroissance de teneur en manganèse de blé à la fin de la saison de croissance. Une migration secondaire peut être à l'origine de la concentration plus importante du manganèse dans les tiges au stade maturation qu'au stade floraison. Le bore en excès parait baisser plus la concentration du manganèse au stade maturation qu'au deux autres.

Les résultats obtenus comme teneurs en manganèse ainsi que comme rendements nous amènent à distinguer les réponses suivantes du blé à l'application des différentes doses du manganèse :

1) Augmentation de rendement de blé et des teneurs à la suite d'un apport de 1 $\mu g.g^{-1}$.
2) Faible baisse du rendement accompagnée d'une faible augmentation des teneurs avec une dose 6 $\mu g.g^{-1}$.
3) Forte baisse du rendement accompagnée d'une forte augmentation des teneurs (notamment pour le sol sur limon) en réponse à la dose 11 $\mu g.g^{-1}$ et particulièrement à la dose 16 $\mu g.g^{-1}$. De ces trois résultats on peut déduire que, pour les sols expérimentés:

1) La dose 1 $\mu g.g^{-1}$ correspond à une dose de fertilisation optimale pour la culture de blé.
2) La dose 6 $\mu g.g^{-1}$ correspond à un seuil de toxicité.
3) La dose 11 $\mu g.g^{-1}$ et plus encore celle de 16 $\mu g.g^{-1}$ à des doses très toxiques. Ceci en l'absence d'apport du bore donc d'un autre élément qui interviendrait dans ce processus (BERRY et WALLACE, 1981). La toxicité du manganèse, se traduisant par la baisse du rendement et l'accroissement des teneurs des plantes, résulte de plusieurs mécanismes d'action de cet élément sur la physiologie des plantes (TROCME, 1973; HELYAR , 1978; HEENA et CAMPBELL, 1981; FALES et OHKI, 1982; FOX, 1983 ...). Etablir des teneurs critiques de seuils toxicités est une procédure difficile sur laquelle les auteurs donnent des résultats différents; MASK et WILSON (1978) ont rapporté que la teneur de 171-181 ppm dans les feuilles de soja correspondrait à la toxicité du manganèse, cependant JONES et NELSON (1978) ont trouvé que pour la même variété de soja la toxicité n'apparaissait pas, même avec la teneur de 320 ppm de manganèse.

L'interaction du bore sur l'effet du manganèse est montrée dans ce travail (tableau 63); mais nous avons constaté que le bore apporté

en excès faisait baisser les teneurs en manganèse dans les différents organes, lorsque le manganèse n'était pas apporté en excès. Cette baisse est moins importante lorsque le manganèse et le bore étaient apportés à la fois en excès. Ce résultat permet de dire que l'absorption du manganèse est affectée négativement mais nous ne pouvons pas affirmer que le mécanisme par lequel le bore intervient a lieu uniquement au niveau du sol ou au niveau de la plante ou les deux à la fois. Les interactions de manganèse avec les autres éléments ont été assez bien étudiées (NALOVIC, 1977; MORAGHAN et RALOWIEZ, 1979; FOY et Al., 1981b), mais celle avec le bore l'est beaucoup moins et mérite d'être approfondie du côté pedochimique comme du côté physiologique. En fait le manganèse représente un cas extrême parmi les éléments de transition aussi bien du point de vue de ses propriétés physico-chimiques (masse atomique, charge électro-positives, rayon ionique et atomique), de son abondance dans la nature et du comportement des complexes qu'il forme (stabilité et pH de précipitation); toutes ces propriétés ne sont pas étrangères à son absorption ni a son interaction avec le bore ou les autres éléments étudiés.

3.3. Prélèvement, migration et accumulation des autres oligoéléments (Cu, Zn, Fe) et effet du manganèse et du bore apportés.

3.3.1. Le cuivre.

Les résultats de l'analyse des plantes ont montré, que leur concentration en cuivre était la plus faible parmi les oligo-éléments étudiés. Ce sont les racines qui accumulent le plus de cuivre ; COIC et al., (1974) l'ont montré pour les plantes fourragères, graminées et légumineuses. Notre travail a souligné que les grains sont les moins riches en cuivre. LONERAGAN (1983) a attribué ce fait à sa fixation sur les parois cellulaires des racines et à son faible transport vers les parties apicales. Les plantes absorbent plus de cuivre lorsqu'elles sont cultivées sur sol sur limon que sur les deux autres ; ceci n'est pas en relation avec le cuivre extrait à l'acide chlorydrique 0,1 N dans chacun d'eux mais avec le pH. L'élution du cuivre par l'eau et le DTPA montre par contre une relation avec son absorption par les plantes et également avec le pH des sols. FOLLETT et al., (1983) ont souligné que plus le pH était élevé plus le cuivre se complexait aux anions hydroxydes formés.

Les prélèvements de plantes, effectués aux différents stades du développement, ont permis de constater une accumulation moins importante de cuivre dans les racines et les limbes au stade début de tallage qu'au stade floraison ; au stade maturation on assiste à une migration secondaire des grains vers les limbes, qui deviennent plus riches qu'au stade floraison. Le prélèvement et la migration du cuivre dans les organes sont influencés par l'apport du bore et du manganèse. L'influence des différentes doses de ces deux éléments peut être plus importante sur la teneur en cuivre d'un organe que sur celle d'un autre ; on pourrait penser que cela est lié à l'accumulation de ces deux éléments dans les organes, et par la suite à leur effet sur la régulation de la répartition qui montre le cuivre. Le manganèse a une influence plus importante que le bore probablement, parce que appartenant avec le cuivre au même groupe de transition leur confère des propriétés physico-chimiques communes déjà évoquées et qui pourraient

se manifester par une compétition d'absorption au niveau des particules des sols et au niveau des racines. MATHUR et LEVESQUE (1983) ont montré que l'interaction entre le cuivre et le manganèse reflétait l'altération des formes de ces éléments dans le sol plutôt qu'un stress physiologique. L'examen des résultats d'analyses des plantes en présence d'excès du bore et du manganèse a montré une tendance à la diminution de leur effet sur les teneurs en cuivre dans les différents organes. BROWN (1979) a trouvé que le bore provoquait une déficience en cuivre dans les plants de tomate.

3.3.2. Le zinc.

L'analyse des plantes indique une accumulation plus importante dans les racines et les gaines que dans les autres organes ; néanmoins la différence entre les organes est moins forte que celles des autres oligoéléments,ce qui pourrait signifier une bonne mobilité du zinc entre les organes. LONERAGAN (1983) a souligné une mobilité importante du zinc dans le phloem. L'ordre d'accumulation que nous avons trouvé diffère de celui trouvé par CHUDE (1983) pour le cacaoyer : Feuille > racines > tige. Comme pour les autres oligoéléments, le blé absorbe plus de zinc lorsqu'il est cultivé sur sol sur limon que sur sol de rendzine et encore moins sur sol sur alluvion. Ce résultat est en relation étroite avec leur teneur en calcaire et avec leur pH,ainsi qu'avec les valeurs de leurs fractions argileuse et finement limoneuse qui sont plus faibles dans le premier que dans les deux derniers (Chap. II) ; il ne l'est pas avec le zinc extrait à l'acide chlorhydrique. KURDI et DONER (1983) ont trouvé que la différence de sorption du zinc et du cuivre entre les sols est plus liée au pH qu'à la capacité d'échange cationique. Les sols calcaires et alcalins ont moins de zinc disponible pour les plantes que les sols non calcaires même quand leur teneur en zinc total est aussi importante (MEHTA et al. 1984). Ces auteurs pensent que l'adsorption du zinc, par le calcaire ou la précipitation d'hydroxyde ou de carbonate de zinc, peut être en partie responsable de la moindre disponibilité du zinc dans les sols calcaires. Sa disponibilité dépend également de pH plus élevé dans ces sols (SHUMAN, 1975 ; PERALTA et al. 1981...).

Les prélèvements effectués aux différents stades du développement ont montré une accumulation plus importante dans tous les organes au stade début de tallage qu'aux deux autres stades.

Cette accumulation est en relation avec l'accumulation de la matière sèche plus importante pendant les deux derniers stades (floraison et maturation). Elle n'est pas modifiée sous l'influence d'apport du bore et du manganèse. CHATTERJEE et al. (1982) ont trouvé que l'accumulation du zinc dans les racines et les pousses de riz cultivé sur sol alluvial diminue avec l'âge, de même que SALINAS et al. (1982), l'ont souligné pour les feuilles de petits pois.

L'excès du bore et du manganèse dans le sol et dans le végétal, s'est traduit par des perturbations physiologiques se répercutant sur les teneurs en zinc dans les différents organes;notamment les racines et les limbes où elles se trouvent diminuées. Cette répercussion résulterait éventuellement du changement de l'absorption de cet élément, mais aussi de la perturbation de la répartition du zinc dans les organes d'où peut être l'augmentation sous l'effet d'excès en manganèse dans les grains contre la baisse dans les limbes; nous soulignons que, d'une manière générale le bore paraît avoir une influence négative plus importante que celle du manganèse. CERDAL et al. (1981) ont indiqué que l'excès du bore baissait la concentration du zinc dans les feuilles de tournesol. Enfin, les résultats laissent penser à un relatif effet additif du bore et du manganèse ajoutés ensemble sur l'accumulation du zinc dans les limbes.

3.3.3. Le fer.

L'analyse des plantes a montré pour les trois sols, une accumulation beaucoup plus importante dans les racines que dans les autres organes et une accumulation moins importante dans les grains que dans les autres organes. Ces résultats indiquent nettement que le fer est peu mobile dès racines vers les parties aériennes notamment les grains. ABO (1980) l'a montré pour le blé cultivé sur solution nutritive et BROWNET et AMBLER (1970) l'ont également souligné pour le maïs. Les plantes prélèvent, comme pour les autres oligoéléments, plus de fer lorsqu'elles sont cultivées sur sol sur limon sur

les deux autres, ce qui est en relation avec l'absence de calcaire et le pH de ce sol plus faible par rapport aux deux autres. ARORA et SEKHON (1981) ont trouvé que le fer assimilable était en relation avec le pH du sol.

Les prélèvements des plantes, effectués aux différents stades, ont permis de constater une accumulation plus importante du fer dans les limbes et les gaines au stade maturation qu'au stade début de tallage et au stade floraison. Les grains en sont moins riches à la maturation, ce qui indiquerait une migration faible du fer vers eux à ce stade. YLARANTA et al. (1979) ont souligné une baisse des teneurs en fer du blé à la fin de la saison de la croissance.

L'excès de manganèse a un effet négatif sur les teneurs en fer du blé, des corrélations négatives et significatives sont trouvées pour tous les organes sauf pour les racines dans le cas des deux sols : sur limon et de rendzine. L'apport en excès du bore et du manganèse à la fois fait baisser significativement des teneurs en fer des organes. Le bore en excès a un effet favorable sur ces teneurs. Ces interactions pourraient avoir lieu suite à l'accumulation en bore et en manganèse par un effet physiologique, mais les excès en ces deux éléments pourraient influencer l'absorption du fer au niveau du sol. ASGHAR et KANEHIRO (1981) ont trouvé que le fer apporté est fixé ou oxydé en Fe^{3+} dans les sols riches en manganèse natif. HALDAR et MANDAL (1982) ont constaté une baisse de fer assimilable sous l'effet d'apport du manganèse au sol limono-argileux. EPSTEIN et STOUT (1972) ont montré que la manganèse interférait dans le transport du fer des racines vers les parties aériennes.

3.4. Prélèvement, migration et accumulation des macro-éléments (P, K, Ca, Mg) et effet du manganèse et du bore apportés.

3.4.1. Le phosphore.

L'analyse des plantes a permis de constater une concentration maximale du phosphore dans les grains et une concentration minimale dans les tiges et les noeuds. Ce résultat montre une

migration importante du phosphore vers les grains. REAY et WAUGH (1981) ont trouvé une concentration en phosphore moins forte dans les tiges de lupin que dans les autres organes. Les plantes absorbent davantage du phosphore du sol sur alluvion que des deux autres, ce sol contient plus du phosphore total ou extractible (Tableau 8, Chap. II).

L'accumulation du phosphore diminue d'une manière importante en fonction du stade de développement; SALINAS et al., (1982)n'ont pas souligné de baisse de teneur en phosphore dans le petit pois et le piment au stade floraison mais plus tard. CHATTERJEE et al., (1982) ont constaté une baisse de teneur en cet élément dans les racines et les pousses des plantes de riz âgées de 90 jours,par rapport à celles âgées de 35 jours.

Le manganèse en excès a un effet négatif sur les teneurs en phosphore dans les organes des plantes ; le bore en excès a un effet positif. Ces effets varient d'un organe à l'autre ; ces deux éléments par leur accumulation dans les organes pourraient perturber la répartition du phosphore dans les divers organes des plantes. L'importance de l'interaction serait influencée par les caractéristiques des sols, cette interaction n'ayant pas la même importance dans les trois sols. SALINAS et al.,(1982) ont souligné une augmentation des teneurs en phosphore dans le petit pois et le piment sous l'effet d'un excès en bore, BROWN (1979) l'a montré dans la tomate. HALDAR et MANDAL (1982) ont trouvé que l'application du manganèse en excès a un effet dépressif sur le phosphore assimilable.

3.4.2. Le potassium.

Le potassium semble bien migrer vers les parties aériennes sauf les grains, les racines étant pauvres par rapport aux limbes, aux tiges et aux noeuds ; ces derniers sont le lieu d'accumulation le plus important en cet élément. COIC et al., (1982) l'ont montré également dans le cas des graminées fourragères. Les plantes absorbent moins de potassium du sol sur limon que des deux autres, ce résultat est en accord avec les teneurs en potassium échangeable

de chaque sol. BAKER et LOW (1970) ont proposé de regarder l'activité d'ions des macro-éléments dans la solution du sol comme une expression de l'intensité ionique par laquelle le sol offre ces ions aux plantes, d'autres ont pensé qu'il y a d'autres paramètres qui jouent aussi (NIELSEN et SORENSEN, 1984).

Comparés aux racines les limbes, les gaines, les épis et les tiges ont des teneurs moins importantes en potassium en fonction du stade de développement ; l'enrichissement des racines pourrait être dû en partie à une migration secondaire ; ce résultat n'ayant pas changé en présence d'excès en bore et en manganèse. IWAHASHI et al.,1982 ont trouvé une baisse des teneurs en potassium en fonction de l'âge dans les feuilles, les tiges et les pétioles de concombre, de même que REDSHAW et GAUDIEL (1982) pour la fève.

L'application excessive du manganèse semble avoir un effet positif sur l'accumulation du potassium, tandis que l'excès en bore a un effet négatif. Ces effets varient dans leur importance d'un sol à l'autre ; ils pourraient être vraisemblablement influencés par les caractéristiques de chaque sol. Ils varient également d'un organe à l'autre, de telle manière qu'ils peuvent être positifs ou négatifs suivant les cas ; cela serait, en partie, la conséquence de l'accumulation du bore et du manganèse dans la plante qui perturberait la répartition du potassium dans les différents organes. DELAS et POUGET (1984) ont constaté une modification de l'absorption et du stockage des éléments nutritifs selon les organes de vigne en fonction de la concentration de la solution nutritive.

3.4.3. Le calcium.

Cet élément migre préférentiellement vers les limbes où il est stocké, les grains étant l'organe le moins riche. D'autres auteurs ont trouvé que le calcium s'accumule particulièrement dans les feuilles, comme c'est le cas pour le concombre (IWAHASHI et al., 1982) et de lupin (REAY et WAUGH, 1981).

Les plantes absorbent plus de calcium du sol sur alluvion et du sol de rendzine que de celui sur limon ; cela correspond à la quantité du calcium présent dans le complexe absorbant ainsi qu'à leur richesse respective en cet élément.

La concentration du calcium dans les limbes décroît en fonction du stade de développement, notamment entre le début de tallage et la floraison. Les tiges et les grains ont une concentration moins importante au stade maturation qu'à la floraison ; ceci correspond à une absorption plus importante de cet élément pendant les deux premiers stades. Pour d'autres plantes, cette évolution peut être différente ; REDSHAW et GAUDIEL (1982) ont trouvé une augmentation des teneurs en calcium des feuilles de fève en fonction du stade de développement, mais une baisse dans les graines de fève. IWAHASHI et al., (1982) ont souligné une baisse dans les feuilles de lupin tandis qu'aucune baisse n'a été constatée dans les pétioles et les racines.

La modification des concentrations en calcium, sous l'effet d'excès en manganèse, est variable d'un organe à l'autre ; elle peut être positive pour un organe (grains) et négative pour un autre (racines). Il serait plausible de penser, que l'excès en manganèse joue son rôle principalement dans les tissus des plantes où il s'accumule, en modifiant ainsi la régulation de la répartition du calcium dans les différents organes. La même explication pourrait être valable pour l'excès en bore, les résultats obtenus dans ce cas étant de même nature. L'action de l'excès simultané du bore et du manganèse semble, selon l'analyse de régression et de variance, être soustractive dans sa répercussion sur la baisse des teneurs en calcium, ce qui favoriserait, comme nous l'avons déjà montré, un antagonisme entre les deux oligoéléments. BROWN (1979) a constaté que l'excès en bore pourrait baisser la concentration en calcium dans le xylème des plants de tomates dans certains génotypes. SALINAS et al., (1982) en ont souligné une baisse dans les feuilles de petit-pois et le piment qu'ils ont attribuée à la réaction entre le bore et le calcium dans la plante. FOY (1983) a souligné l'existence d'une interaction entre le manganèse et le calcium dans plusieurs sols et végétaux.

3.4.4. Le magnésium.

Comme le calcium, cet élément semble migrer préférentiellement vers les limbes où il est stocké, les racines étant l'organe le moins riche par rapport aux autres organes. L'accumulation, plus importante de magnésium dans les feuilles que dans les autres organes, a été

montrée dans d'autres plantes comme le lupin (REAY et WAUGH, 1981) et le concombre (IWAHASHI et al., 1982). Le blé absorbe plus de magnésium du sol de rendzine et du sol sur alluvion que du sol sur limon. Le complexe absorbant de ce dernier est moins riche en magnésium que celui des deux précédents. Il n'est pas exclu que cela soit en relation avec les types d'argiles des sols.

La concentration en magnésium dans les limbes est plus importante au stade floraison qu'aux deux autres stades ; lors de ces derniers, elle y est sensiblement égale. Il nous semble difficile d'expliquer ce résultat par l'accumulation de la matière sèche ou par l'hypothèse d'un besoin en magnésium plus important au stade floraison que dans les deux autres, les autres organes ayant des teneurs pratiquement stables en fonction du stade de développement de la plante.

Des résultats semblables ont été constatés dans les feuilles de concombre (IWAHASHI et al., 1982), tandis qu'une faible baisse a été enregistrée dans les feuilles de fève (REDSHAW et GAUDIEL, 1982). L'effet négatif de l'excès de manganèse sur l'accumulation du magnésium, dans les différents organes, n'est pas significatif et aucune corrélation n'a été décelée. Aucun effet de manganèse sur l'accumulation en magnésium chez les graminées fourragères n'a été constaté (LAUGHLINE et al., 1981). Par contre, le manganèse diminue la concentration du magnésium dans les feuilles de soja (HEENAN et CAMPBELL, 1981). Le bore joue un rôle synergique dans l'accumulation du magnésium, cette accumulation étant souvent corrélée significativement avec l'apport du bore. Il est difficile d'affirmer que le bore intervient au niveau de l'absorption par sa présence excessive dans le milieu ou au niveau de la plante par son accumulation importante dans cette dernière. SALINAS et al., (1982) ont montré que l'ajout du bore augmentait la teneur en magnésium dans les feuilles de petit-pois.

VIII - 4. CONCLUSION.

Ce chapitre destiné à étudier l'alimentation oligominérale du blé cultivé en pot a permis l'obtention de plusieurs résultats intéressants.

- La cinétique de l'accumulation du bore et du manganèse dans les différents organes, est en relation avec les doses appliquées de ces deux éléments ainsi qu'avec la quantité fixée à la fin de la culture par les sols expérimentés. Ceci nous a permis de cerner le problème de la fertilité, à la fois du côté plante comme du côté sol ; d'ailleurs une certaine analogie s'est révélée à cet égard entre le sol et la plante pour le bore.
- La répartition de ces deux éléments dans les organes du blé peut être modifiée sous l'effet de leurs excès dans les sols retenus.
- A un seuil critique de bore et de manganèse appliqués correspond un seuil de concentration dans les tissus, au-delà duquel les rendements diminuent ; la dose est alors toxique.
- L'action antagoniste du bore et du manganèse se manifeste parfois d'une manière significative sur la diminution de l'absorption et de l'extraction de ces deux éléments dans les trois sols.
- La relation entre les caractéristiques des sols étudiés (notamment le pH et la teneur en calcaire) et l'absorption des différents éléments dosés, notamment le bore et le manganèse, est systématiquement présente et même parfois significative.
- Le bilan nutritif minéral de la plante, y compris le bore et le manganèse, au cours de son cycle de développement.
- Sans pouvoir en expliquer le mécanisme, nous avons mis en évidence les interactions du bore et du manganèse, entre eux et avec les autres oligoéléments et macroéléments (synergie, antagonisme, additivité) ; nous pouvons citer plusieurs exemples de ces interactions :
    . antagonisme entre le manganèse et le cuivre, entre le manganèse et le fer, entre le manganèse et le phosphore et le manganèse et le calcium,
    . antagonisme entre le bore et le zinc,
    . synergie entre le bore et le fer, entre le bore et le phosphore et entre le bore et le magnésium,
    . effet additif de l'excès simultané du bore et du manganèse sur l'accumulation du zinc dans les limbes.

L'étude permet d'avancer plusieurs hypothèses pour expliquer ces multiples interactions :

- interaction au niveau du sol,
- interaction au niveau de l'absorption sol-plante,
- interaction au niveau des tissus des plantes.

Après avoir observé visuellement (chap. VI) les désordres nutritionnels minéraux dus à des excès en bore et en manganèse, nous les avons quantifiés par nos résultats analytiques.

CHAPITRE IX

INFLUENCE DE LA NUTRITION OLIGOMINERALE DE LA PLANTE MERE SUR CERTAINES PROPRIETES BIOLOGIQUES DE LA DESCENDANCE

A partir des récoltes obtenues à la fin de la première expérience, nous avons étudié d'une part l'effet d'un excès de bore et de manganèse et d'autre part d'une carence sur certaines propriétés biologiques de la descendance. Nous avons donc utilisé des grains provenant de plantes ayant reçu un excès de bore (8ppm) ou de manganèse (16 ppm) ou n'ayant pas reçu de fertilisation en ces éléments.

Les résultats présentés ici portent sur la faculté germinative des semences, les symptômes observés et la production de biomasse ainsi que sur les prélèvements et l'accumulation des éléments nutritifs des plantes provenant de ces semences particulières. Nous rappelons que ces plantes sont cultivées en raison de trois répétitions en pot sur sol sur limon et sol de rendzine mais n'ont reçu aucune fertilisation.

IX - 1 - FACULTE GERMINATIVE DES SEMENCES.

La germination, percée des enveloppes seminales par la radicule (COME, 1975), est conduite dans les conditions rappelées au chapitre III avec 25 grains pour chaque traitement. La faculté germinative est donnée par le tableau 82. Les grains provenant des plantes n'ayant pas reçu de bore

Tableau 82 - Faculté germinative (pourcentage des grains germés après 24 h) des semences

Traitement / sol	Excès en B	Excès en Mn	Sans apport de B et Mn.	Témoin
Sol sur limon	68	72	93	98
Sol de rendzine	76	84	93	98

et de manganèse germent un peu moins bien que les témoins, mais il ressort surtout qu'un excès de bore ou de manganèse appliqué sur les plantes mères affecte les propriétés germinatives des grains récoltés. L'effet du bore est particulièrement important et la toxicité des deux éléments est plus élevée sur sol sur limon.

IX - 2 - SYMPTOMOLOGIE ET BIOMASSE.

2.1. Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de bore.

Les plantes sont chétives. Les tiges, très courtes et minces leur confèrent un aspect de "plantes naines". Les limbes sont également courts et étroits (fig. 85) et les grains produits sont petits et étriqués. La production de chaque organe ainsi que les écarts-types et les coefficients de variation (C.V.%) sont regroupés dans le tableau 83 On peut voir que les écarts types et les coefficients de variation sont satisfaisants.

Nous constatons que la toxicité de bore manifestée sur les plantes mères (Chap. VII) se répercute sur la production de biomasse de la descendance qui est très affectée. Nous avons comparé ces résultats, à l'aide du test de STUDENT (t), à la production de biomasse dans le cas d'une fertilisation complète (FC) et sans aucune fertilisation (FNS) (tableau 83). Nous observons une influence négative toujours significative de la toxicité du bore fourni en excès aux plantes mères, sur la production de tous les organes des plantes de la génération suivante.

2.2. Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de manganèse.

Comme pour le bore ces plantes ne montrent pas de symptômes visibles caractéristiques (fig. 85), mais leur développement est affecté (tiges et feuilles courtes et volume des grains réduit). Cette réduction est cependant moins importante que dans le cas d'un excès de bore.

La production de biomasse est donnée dans le tableau 84 Nous pouvons voir l'effet toxique du manganèse sur la production de biomasse. Comparé à celle des plantes ayant reçu une fertilisation complète (FC), elle est systématiquement inférieure dans les deux sols, les différences sont significatives à un niveau de probabilité très élevé (0,99); les valeurs de t étant particulièrement grandes pour les grains.

Cet effet toxique du manganèse s'avère significatif aussi, lorsque l'on compare la production de biomasse à celle de plantes dont la culture est faite sans aucune fertilisation (FNS) (tableau 84).

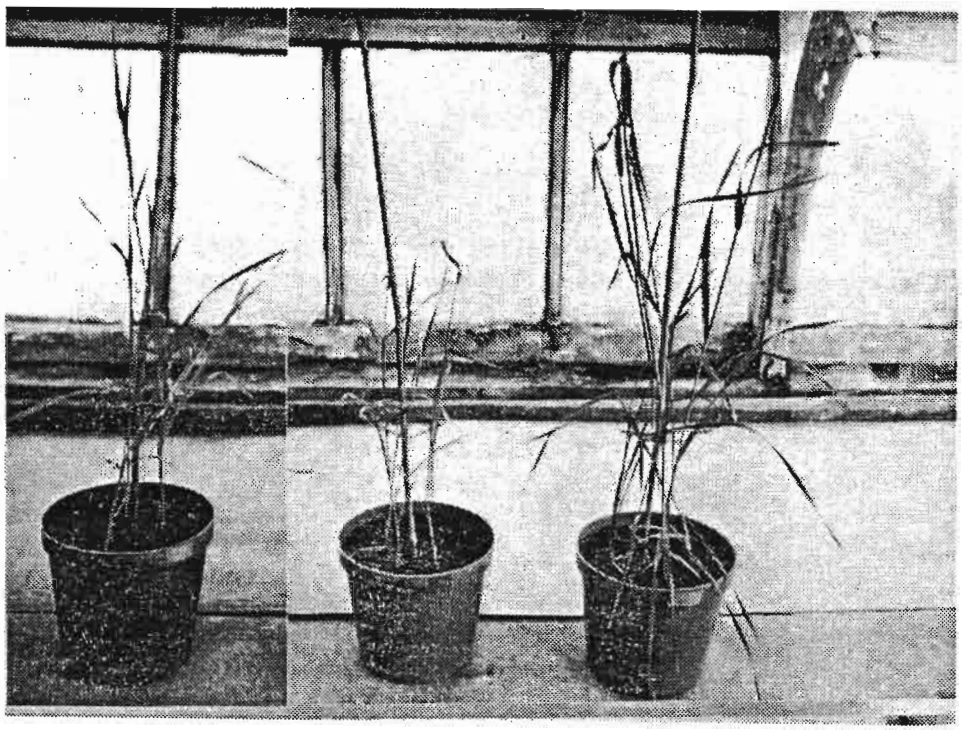


Figure 85 Plantes dont les parents sont intoxiqués en Mn (à gauche) ou en B (au milieu) et des plantes témoins (à droite).

TABLEAU 83 - Production de biomasse de blé dont les semences proviennent de plantes mères intoxiquées en bore comparée, à l'aide de test, à celle de plantes non fertilisées (FNS) d'une part et à celle de plantes ayant reçu une fertilisation complète (FC) d'autre part.

Sol	Organe	Moyennes (g MS/pot)			Ecarts-type			C.V. %			t *	
		Excés en B	FNS	FC	Excès en B	FNS	FC	Excès en B	FNS	FC	Ex.en B/FNS	Ex.en B/FC
Sol sur limon	Grains	0,97	2,80	4,98	0,03	0,10	0,11	3,36	3,74	2,17	29,0	61,4
	Limbes	0,64	1,58	2,59	0,02	0,031	0,085	2,65	1,93	3,27	46,3	39,0
	Gaines	0,57	1,74	2,63	0,03	0,030	0,11	5,69	1,74	4,21	38,7	30,9
	Tiges	0,85	3,17	4,50	0,03	0,065	0,17	3,95	2,05	3,77	55,1	36,5
Sol de rendzine	Grains	1,07	3,82	6,29	0,01	0,12	0,17	1,19	3,17	2,73	29,3	40,1
	Limbes	0,67	1,59	2,45	0,03	0,054	0,099	4,36	3,40	4,05	22,6	25,2
	Gaines	0,65	1,60	1,97	0,03	0,078	0,064	4,12	4,91	3,25	15,7	26,3
	Tiges	1,05	3,18	1,97	0,05	0,043	0,15	5,13	1,35	3,23	69,2	33,2

* Tous les t sont significatifs au niveau de probabilité 0,99 pour le nombre de degré de liberté $n_1 + n_2 - 2 = 4$ ($t_4^{0,99} = 3,747$).

Tableau 84- Production de biomasse de blé dont les semences proviennent de plantes mères intoxiquées en manganèse comparée, à l'aide de test t, à celle de plantes de FNS d'une part et à celle de FC d'autre part.

Sol	Organe	Moyennes (g.M.S/pot)			Ecarts-type			C. V.%			t *	
		Excès en Mn	FNS	FC	Excès en Mn	FNS	FC	Excès en Mn	FNS	FC	Excès en Mn/FNS	Excès en Mn/FC
Sol sur limon	Grains	1,92	2,80	4,98	0,07	0,10	0,11	3,52	3,74	2,17	12,3	25,3
	Limbes	0,74	1,58	2,59	0,032	0,031	0,085	4,29	1,93	3,27	33,1	16,7
	Gaines	0,74	1,74	2,63	0,040	0,030	0,11	5,50	1,74	4,21	33,9	16,5
	Tiges	1,07	3,17	4,50	0,074	0,065	0,17	6,91	2,05	3,77	37,1	25,4
Sol de Rendzine	Grains	1,78	3,82	6,29	0,070	0,12	0,17	3,94	3,17	2,73	41,4	42,2
	Limbes	0,91	1,59	2,45	0,045	0,054	0,099	4,96	3,40	4,05	35,5	24,5
	Gaines	0,80	1,60	1,97	0,03	0,078	0,064	3,90	4,91	3,25	27,8	28,5
	Tiges	1,24	3,18	1,97	0,11	0,043	0,15	9,27	1,35	3,23	32,2	31,1

* Tous les t sont significatifs au niveau de probabilité 0,99.

2.3. Cas des plantes dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse.

Les plantes ne présentent pas de symptômes caractéristiques, mais elles se développent moins bien que le témoin tout en étant moins affectées dans leur croissance que les plantes des deux traitements précédents (dont les parents avaient reçu un excès de bore et de manganèse). Les grains produits sont également moins bien remplis que ceux du témoin.

Nous donnons dans le tableau 85 les résultats de la production de biomasse de ces plantes. Si nous comparons ces résultats à ceux des tableaux 83 et 84, nous constatons que la biomasse est plus élevée dans ce cas. Cette production comparée, au moyen du test t, avec celle des plantes ayant reçu une fertilisation complète (tableau 85) montre une baisse systématique et significative du rendement de tous les organes pour les deux sols. Cette baisse est significative aussi lorsque la production est comparée, au moyen du test t également, avec celles des plantes n'ayant reçu aucune fertilisation (tableau 85). Nous signalons que les valeurs de t sont beaucoup moins importantes dans cette dernière comparaison.

IX -3 - PRELEVEMENT ET ACCUMULATION DES OLIGOELEMENTS.

3.1. Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de bore.

3.1.1. Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse.

Les moyennes des teneurs en bore et en manganèse dans les différents organes de la plante avec leurs écarts-type et leurs coefficients de variation sont regroupés dans le tableau 86. Comparées aux résultats d'analyse des racines de plantes dont les grains mères ne sont pas intoxiqués en bore (annexe), nous constatons que pour les deux sols les racines accumulent des quantités de bore sensiblement analogues (respectivement 139 $\mu g.g^{-1}$ dans le sol sur limon et 42,1 $\mu g.g^{-1}$ dans le sol de rendzine). De telles comparaisons des analyses des autres organes montrent qu'ils sont plus riches en bore. Il s'agit notamment des grains qui en contiennent 2,2 fois plus dans le cas du sol sur limon 1,9 fois dans le cas du sol de rendzine. Cela signifie que le bore migre

Tableau 85 - Production de biomasse de blé dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse (- B et Mn) comparée, à l'aide du test t, à celles de plantes de FNS d'une part et à celle de plantes de FC d'autre part.

Sol	Organe	Moyennes (9 M.s/pot)	Ecarts-type	C.V. %	t *	
					- B et Mn / FNS	- B et Mn / FC
Sol sur limon	Grains	2,33	0,067	2,88	6,56	36,04
	Limbes	0,96	0,085	8,89	11,85	32,40
	Gaines	0,89	0,091	10,26	14,58	29,78
	Tiges	2,04	0,10	4,48	13,49	30,20
Sol de rendzine	Grains	2,65	0,14	5,14	11,18	31,01
	Limbes	1,17	0,11	9,47	5,79	22,52
	Gaines	1,27	0,047	3,66	6,26	17,61
	Tiges	1,94	0,096	4,96	18,16	35,10

* Tout les t sont significatifs au niveau de probabilité 0,99.

Tableau 86 - Concentrations (en $\mu g.g^{-1}$ de M.S) des différents organes de blé en bore et manganèse dans le cas où les plantes mères ont reçu un excès de bore.

Sol	Organe	Moyenne		Ecart - type		C.V. %	
		B	Mn	B	Mn	B	Mn
Sol sur limon	Racines	142,1	110,71	2,26	2,81	1,59	2,54
	Tiges	17,07	15,57	1,39	1,69	8,12	10,85
	Gaines	42,93	104,99	1,18	3,74	2,8	3,56
	Limbes	88,40	185,91	1,91	5,04	2,16	2,71
	Grains	4,25	58,19	0,07	1,38	1,66	2,37
Sol de Renzine	Racines	42,76	66,30	3,48	2,45	10,61	3,69
	Tiges	10,37	6,97	0,61	0,08	5,89	1,16
	Gaines	26,83	31,10	0,83	1,10	4,95	3,54
	Limbes	44,5	141,19	2,91	4,04	6,54	2,86
	Grains	3,70	21,41	0,20	1,12	5,41	5,24

davantage vers les parties aériennes (tiges, gaines, limbes et particulièrement dans les grains formés) par rapport au cas de FNS.
Si on fait les mêmes comparaisons pour le manganèse, nous constatons que cet élément s'accumule très légèrement dans les racines (dans le cas de FNS, respectivement 103,87 $\mu g.g^{-1}$ pour le sol sur limon et 63,84 pour le sol de rendzine); mais que les autres organes en sont moins riches : les limbes en contiennent 1,4 fois moins dans le cas du sol sur limon et 1,3 fois moins dans le cas du sol de rendzine. Cette différence est toutefois moins importante pour les grains (respectivement 1,1 et 1,2 fois moins riche). Le bore, comme nous l'avons vu au chapitre VIII, continue à jouer également ici un rôle négatif sur la teneur en manganèse dans les parties aériennes des plantes de blé.

3.1.2. Prélèvement et accumulation des autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn).

Nous donnons les teneurs en fer, en cuivre et en zinc dans les différents organes au tableau 87. Nous avons constaté que la toxicité en bore ne paraît pas avoir d'effet sur le prélèvement et l'accumulation du fer dans les différents organes du blé par rapport à ceux des plantes sans fertilisation (FNS) et dont les grains mères sont normaux. Nous voyons aussi que la toxicité en bore exercée sur les plantes mères continue à jouer un rôle favorable à l'accumulation du cuivre dans les grains; comparés à ceux des plantes issues des grains mères non intoxiqués on trouve : 4,02 $\mu g.g^{-1}$ contre 1,96 $\mu g.g^{-1}$ pour le sol de rendzine et 5,71 $\mu g.g^{-1}$ contre 2,70 $\mu g.g^{-1}$ pour le sol sur limon soit 2,1 fois plus pour les deux sols. Cet effet favorable s'étend à l'accumulation du zinc. Les grains des plantes dont les parents sont intoxiqués en bore sont plus riches que ceux des témoins (30,43 $\mu g.g^{-1}$ contre 22,60 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol de rendzine et 28,08 $\mu g.g^{-1}$ contre 22,32 $\mu g.g^{-1}$ pour le sol sur limon).

3.2. Cas des plantes dont les parents ont reçu un excès de manganèse.

3.2.1. Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse.

Les résultats sont consignés dans le tableau 88. Comparés aux résultats d'analyse des racines de plantes provenant des grains mères non intoxiqués (annexe) nous constatons que les racines accumulent

Tableau 87 - Concentrations (en $\mu g.g^{-1}$ de M.S) des différents organes de blé en fer, en cuivre et en zinc, dans le cas ou les plantes mères ont reçu un excès en bore.

Sol	Organes	Moyennes			Ecart-type			C.V.%		
		Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn
Sol sur limon	Racines	3205,0	39,17	76,22	147,29	0,87	1,04	4,60	2,21	1,36
	Tiges	77,11	3,01	36,60	4,53	0,07	1,62	5,88	2,35	4,42
	Gaines	261,93	5,22	44,71	9,10	0,48	0,84	3,48	9,25	1,89
	Limbes	232,48	9,21	48,57	12,49	0,39	1,18	5,37	4,27	2,42
	Grains	55,84	5,71	28,06	4,02	0,25	1,60	7,20	4,38	5,70
Sol de rendzine	Racines	1464,3	27,47	33,26	7,57	1,06	0,97	0,52	3,85	2,92
	Tiges	141,17	2,57	23,97	2,12	0,15	1,30	1,50	5,78	5,40
	Gaines	143,60	3,37	41,66	0,95	0,23	1,33	0,66	6,83	3,19
	Limbes	159,60	10,69	33,93	4,38	0,25	0,81	2,75	5,76	2,38
	Grains	44,35	4,02	30,43	0,92	0,13	2,15	2,07	3,29	7,05

Tableau 88 - Moyennes ($\mu g.g^{-1}$ de MS), écarts-types et coefficients de variation (c.v %) des concentrations en bore et en manganèse des différents organes de blé sous l'effet toxique du manganèse.

Sol	Organe	Moyenne		Ecart-type		C.V.%	
		B	Mn	B	Mn	B	Mn
Sol sur limon	Racines	124,17	127,36	1,40	3,68	1,13	2,89
	Tiges	8,07	22,30	0,41	1,52	5,08	6,83
	Gaines	32,27	156,37	1,94	8,02	6,00	5,13
	Limbes	55,00	305,12	2,36	3,44	4,29	1,13
	Grains	1,59	73,62	0,16	3,11	10,30	4,23
Sol sur rendzine	Racines	34,83	76,96	2,19	3,51	6,29	4,56
	Tiges	5,57	9,22	0,40	0,22	7,26	2,36
	Gaines	14,20	55,54	0,70	2,44	4,93	4,40
	Limbes	33,57	205,45	0,71	6,08	2,11	2,96
	Grains	1,60	29,27	0,10	0,83	6,25	2,82

moins de bore dans le cas du sol sur limon et encore moins dans le cas du sol de rendzine, respectivement : 11,3 % et 16,8 % en moins . De telles comparaisons faites sur les autres organes montrent que l'effet toxique du manganèse ne parait pas favoriser l'accumulation du bore,les grains contiennent 16,3 du bore en moins dans le cas du sol sur limon et 18,8 % en moins dans le cas du sol de rendzine. La concentration du bore dans les limbes est moins affectée: 8,3% et 12,2 % en moins , respectivement dans le cas du sol sur limon et de celui de rendzine . L'enrichissement en manganèse des grains mères, se répercutant sur les plantes de la descendance, favorisent l'accumulation du manganèse dans les racines qui en contiennent plus que celles de la FNS (sans ajout de fertilisation) : 22,6 % dans le cas du sol sur limon et 20,6 % dans le cas du sol de rendzine. Les autres organes,excepté les gaines dans le cas du sol sur limon, sont plus riches en manganèse que ceux de la FNS; ainsi les grains accumulent 10,6 % de plus dans le cas du sol sur limon et 12,2 % dans le cas du sol de rendzine. Pour les limbes, l'enrichissement est de 17,9 % dans le cas du sol limon et de 15,7 % dans le cas du sol de rendzine.

3.2.2. Les autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 89.

L'effet négatif de l'excès du manganèse sur le prélèvement du fer manifesté sur les plantes mères, quoique dilué, persiste dans le cas des plantes issues de ces grains surtout sur les limbes qui sont moins riches que ceux des plantes (FNS) : 11,7 % pour le sol sur limon et 11,0 % pour le sol de rendzine.

Comme nous l'avons montré (chap.VIII), l'excès en manganèse favorise le prélèvement du cuivre par les plantes. Cet effet, quoique moins important, se retrouve sur la descendance de ces plantes surtout sur les grains qui sont plus riches en cuivre que ceux des plantes (FNS), respectivement: 4,40 $\mu g.g^{-1}$ contre 2,70 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol sur limon et 2,50 $\mu g.g^{-1}$ contre 2,0 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol de rendzine . Les limbes sont également plus riches: respectivement 15,5 $\mu g.g^{-1}$ contre 11 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol sur limon et 12,2 $\mu g.g^{-1}$ contre 9,6 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol de rendzine.

Tableau 89 - Concentrations (en $\mu g.g^{-1}$ de Ms) des différents organes de blé en fer, en cuivre et en zinc dont les plantes ont reçu un excès en manganèse.

Sol	Organe	Moyenne			Ecart-type			C.V.%		
		Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn
Sol sur limon	Racines	2654,7	42,15	79,86	206,09	1,76	0,89	7,76	4,17	1,12
	Tiges	69,3	3,38	31,31	1,60	0,16	1,09	2,31	4,68	3,48
	Gaines	246,9	4,73	37,30	5,88	0,38	1,27	2,38	1,76	3,40
	Limbes	207,3	15,52	56,33	7,64	1,06	2,14	3,68	6,83	3,80
	Grains	57,1	4,40	27,73	1,56	0,34	1,46	2,73	7,74	5,26
Sol de Rendzine	Racines	1435,7	40,0	46,07	26,39	0,70	1,47	1,84	1,76	3,19
	Tiges	19,87	3,25	22,01	0,65	0,17	0,52	3,27	5,26	2,37
	Gaines	120,5	3,61	45,97	3,67	0,38	0,72	3,04	10,55	1,56
	Limbes	140,33	12,37	31,13	2,39	0,62	1,36	1,70	5,0	4,36
	Grains	41,47	2,50	25,95	0,93	0,18	1,41	2,24	7,18	5,43

Comparé aux analyses de plantes de la FNS, nous avons retrouvé également l'effet positif de l'excès du manganèse sur la tenue en zinc des grains : 27,7 $\mu g.g^{-1}$ contre 22,3 $\mu g.g^{-1}$ pour le sol sur limon et 26,0 $\mu g.g^{-1}$ contre 22,6 pour le sol de rendzine. Pour les autres organes l'effet du manganèse ne se manifeste pas nettement.

3.3. Cas des plantes dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse.

3.3.1. Prélèvement et accumulation du bore et du manganèse.

Nous regroupons les résultats des teneurs en bore et en manganèse des différents organes de blé dans le tableau 90. Comparée à celle obtenue dans les organes des plantes normales et n'ayant reçu aucune fertilisation (annexe), nous constatons, dans tous les organes, une concentration moins importante en bore. La diminution dans les limbes est respectivement de 10,2 % pour le sol sur limon et de 14,8 % pour le sol de rendzine; tandis que dans les grains elle est respectivement de 14,7% et de 10,8 %.

Des teneurs moins importantes sont également trouvées pour le manganèse dans tous les organes; la différence varie d'un organe à l'autre, pour les limbes, la diminution est de 24,8 % du manganèse dans le cas du"blanc" pour le sol sur limon et de 15,2 % pour le sol de rendzine. Pour les grains elle est respectivement de 18,4 % et de 13,9 %.

3.3.2. Prélèvement et accumulation des autres oligoéléments (Fe, Cu, Zn).

Les résultats sont consignés dans le tableau 91 . Nous constatons que l'absence de fertilisation en bore et en manganèse des plantes mères n'affecte pas le prélèvement et l'accumulation du fer dans les différents organes de la descendance.

Pour le cuivre aucun effet n'est décelé sauf la teneur des racines qui contiennent moins de cuivre que leurs homologues du("F.N.S") - 13,0 % pour le sol sur limon et 12,7 % pour le sol de rendzine. De même les teneurs en zinc ne sont pas modifiées à l'exception toutefois de celles des gaines qui sont moins riches : 17,8 % pour le sol sur limon et 15,1 % pour le sol de rendzine.

Tableau 90 - Moyennes(en $\mu g.g^{-1}$ de MS), écarts-types et coefficients de variation (C.V.%) des concentrations en bore et en manganèse des différents organes de blé dont les parents n'ont pas reçu de fertilisation en ces éléments.

Sol	Organe	Moyenne		Ecart-type		C.V.%	
		B	Mn	B	Mn	B	Mn
Sol sur limon	Racines	101,50	113,54	3,58	4,15	3,53	3,65
	Tiges	8,60	14,85	0,72	0,93	8,39	6,23
	Gaines	31,52	125,52	1,49	4,21	4,73	3,35
	Limbes	53,83	194,75	3,07	4,36	5,70	2,24
	Grains	1,42	54,27	0,17	2,19	14,32	4,03
Sol de rendzine	Racines	35,30	60,63	1,68	3,08	4,77	5,08
	Tiges	6,23	7,71	0,35	0,92	5,64	11,99
	Gaines	15,67	38,13	0,32	1,49	2,05	3,92
	Limbes	32,80	150,63	1,55	3,14	4,73	2,09
	Grains	1,77	22,46	0,15	1,16	8,63	5,16

Tableau 91 - Concentrations (en $\mu g.g^{-1}$ de MS) des différents organes de blé en fer, en cuivre et en zinc dont les parents n'ont pas reçu de bore et de manganèse.

Sol	Organes	Moyenne			Ecart -type			C.V.%		
		Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn	Fe	Cu	Zn
Sol sur limon	Racines	2910,3	33,0	80,9	163,43	1,53	1,55	5,62	4,63	1,92
	Tiges	70,1	2,45	35,0	1,91	0,20	1,27	2,72	8,25	3,62
	Gaines	269,5	4,91	38,0	8,01	0,11	1,65	2,97	2,24	4,34
	Limbes	235,5	12,0	51,2	5,15	0,91	2,26	2,19	7,57	4,41
	Grains	59,2	2,74	22,0	2,94	0,22	1,02	4,96	8,15	4,64
Sol de Rendzine	Racines	1602,0	23,0	31,7	73,51	0,97	0,85	4,59	4,20	2,68
	Tiges	133,1	2,3	25,2	4,67	0,11	1,0	3,51	4,70	3,97
	Gaines	137,9	3,15	38,0	1,45	0,08	2,08	1,05	2,57	5,48
	Limbes	158,4	9,8	33,9	6,14	0,39	0,90	3,88	3,96	2,65
	Grains	46,2	1,9	23,6	0,87	0,13	0,70	1,89	6,77	2,97

IX - 4 - INTERPRETATION ET CONCLUSION.

Nous avons montré au cours de ce chapitre que des plantes de blé carencées en bore et en manganèse, ou celles ayant reçue un excès en ces oligoéléments produisent des grains qui ont la faculté germinative faible et leur descendance est affaiblie. Il s'agit d'un aspect de la prédermination physiologique des semences, phénomène qui recouvre les"effets des conditions dans lesquelles elles se sont formées, sur leurs propriétés et sur celles de leur descendance"(CHAUSSAT et LEDEUNFF,1975). Parmi ces nombreux facteurs (climatiques et édaphiques) jouant un rôle déterminant, la nutrition minérale et particulièrement la nutrition en oligoélément a été peu étudiée (CHAUSSAT et BUINOT, 1984) aussi, malgré l'intérêt biologique et agronomique que ces phénomènes peuvent présenter, les mécanismes ne sont pas bien connus et seules quelques hypothèses peuvent être formulées.

L'abaissement du taux de germination ne peut être attribué à une dormance puisque cette dernière, chez les céréales, est rapidement levée au cours de la conservation. Il doit donc résulter d'une perte de la viabilité. Nous avons d'ailleurs constaté que cette perte affecte, il est vrai faiblement, les grains dont les plantes mères n'ont pas reçu de bore et de manganèse qui semblent donc supporter moins bien les phénomènes de vieillissement.

Les modifications de germination les plus marquantes concernent évidemment les caryopes intoxiqués en bore et en manganèse. De nombreux mécanismes pourraient être en cause. Tout d'abord les semences intoxiquées sont modifiées dans leur aspect, ainsi d'ailleurs que dans leur structure histologique (résultats non reportés). Ces modifications, notamment des enveloppes peuvent entrainer une moins bonne protection de l'embryon au cours de la conservation. Par ailleurs nous savons que des excès de bore et de manganèse peuvent modifier l'équilibre minéral (chap.VIII; SMITH, 1979) les activités enzymatiques (FOY, 1983) et le métabolisme (GAVALAS et CLARK, 1971; FOLLET et al., 1981) et même provoquer des déséquilibres hormonaux (ALBERT,1962; CORY et al.,1966;FOY,1983) probablement indispensable à une bonne conservation des semences.

Il ne faut pas oublier non plus que la germination au sens large (COME, 1975) implique des phénomènes de croissance et que l'effet

d'une carence ou d'un excès peut se manifester sur la germination comme il le fait classiquement sur la croissance.

L'affaiblissement de la croissance de la descendance se pose en d'autres termes puisqu'ici les plantes choisies sont issues de semences viables. Le moindre développement des plantes dont les grains provenant de pieds - mères n'ayant pas reçu de bore et de manganèse peut tout d'abord être attribué aux réserves moins importantes de leur caryopse. On sait que ce sont les grosses semences qui donnent les plantes les plus rigoureuses (CHAUSSAT et LEDEUNFF, 1975). Il est aussi évident que pour ces semences on assiste à des effets additifs de la non fertilisation de leur descendance; étant donné que leur teneur en oligoéléments est moins importante que celles des plantes de la fertilité naturelle spécifique (sans fertilisation) mais provenant de semences normales. Les désordres chimiques provoqués par l'absence de fertilisation en bore et en manganèse se trouvent donc accentués.

L'affaiblissement de la croissance des plantes issues de grains intoxiqués pourrait venir de plusieurs facteurs qui ne sont pas faciles à déterminer, tout d'abord il doit y avoir les effets d'une masse moins importante de réserves organiques puisque les semences sont dans ce cas plus petites. Mais cela ne semble pas suffisant pour rendre compte de toute la différence. Il ne peut s'agir de toxicité puisque, par un phénomène de dilution. (JARREL et BEVERLY, 1982)

, Les teneurs de ces plantes affaiblies sont voisines de la normale. Cependant la dilution n'est que progressive et il se peut qu'au cours des premières phases de développement, l'excès de bore ou de manganèse venant de la semence exerce le rôle antagoniste et néfaste que nous leur connaissons.

Il faut aussi remarquer que les teneurs en bore et en manganèse de ces plantes sont plus importantes et plus proches de la normale que celles servant à exprimer la fertilité naturelle spécifique; cependant, elles sont moins développées.

L'hypothèse d'une action prolongée prenant son origine dans la perturbation du métabolisme des acides nucléiques (ALBERT, 1962; CORY et al., 1966) n'est pas à exclure.

Une carence en bore ou en manganèse constitue un bon exemple de prédétermination physiologique qui affecte la qualité de la semence et la plante par la suite. Bien que nous ayons présenté ici des cas extrèmes, il n'est pas douteux que des situations analogues puissent se rencontrer dans la pratique agricole.

RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

Nous avons montré dans un travail antérieur (ABO, 1980) la nécessité, dans toute étude de fertilité et de nutrition oligominérale, d'étudier à la fois la plante et son milieu. Cette idée à été reprise dans un ensemble de recherches sur une culture de blé tendre de printemps en pots afin d'évaluer l'influence du bore et du manganèse sur la fertilité de trois sols : sol sur limon, sol de rendzine (GRIGNON-France) et sol sur alluvion de la vallée de l'Euphrate (Syrie) ; et sur la nutrition minérale, le développement et la production de blé cultivé sur ces trois sols.

Nous avons commencé (Chap. II) par étudier les sols sur le plan physique, chimique, minéralogique et pédologique afin de bien les caractériser. Cette étude nous fournit un certain nombre de faits indispensables pour comprendre l'absorption, l'accumulation du bore et du manganèse et des autres éléments étudiés (Cu, Fe, Zn, K, P, Ca, Mg) dans la plante et leurs interactions importantes. Grâce à cette étude, les trois sols sont classés, au point de vue de leur fertilité, dans l'ordre suivant : sol de rendzine > sol sur limon > sol sur alluvion. La production de biomasse de blé (Chap. VII) confirme cet ordre. Les différents traitements appliqués dans un dispositif expérimental approprié (factoriel et pyramidal, Chap. III) et les techniques analytiques très précises aboutissant à des résultats fiables (Chap. IV), ont permis l'interprétation statistique des résultats et la mise en évidence de plusieurs informations obtenues.

Divers symptômes visuels de stress oligominéral sont décrits (Chap. VI), ainsi que des influences souvent négatives des excès en bore et en manganèse sur la longueur des limbes, celles des tiges, le nombre de feuilles et d'épillets et sur la biomasse.

Les plantes cultivées en l'absence de bore et de manganèse ou celles qui le sont en présence d'excès en ces deux éléments, produisent des semences qui germent moins bien et dont la descendance présente une croissance affectée et un désordre nutritionnel (Chap. IX). Des recherches biochimiques et histologiques seraient souhaitables à ce sujet.

De multiples résultats concernant l'élution (Chap. V), le pré-

lèvement, la migration et l'accumulation des différents éléments ont été obtenus :

- L'absorption du *potassium* et du *magnésium* ainsi que l'élution de potassium sont moins importantes pour le sol sur limon, que pour le sol de rendzine et sur alluvion. Ce résultat est en relation avec la quantité de ces deux éléments dans le complexe absorbant du sol. La concentration du potassium diminue en fonction du stade du développement dans tous les organes sauf les racines ; cela est dû vraisemblablement d'une part à l'augmentation de la matière sèche et d'autre part à une migration secondaire. Son accumulation dans les limbes, contrairement à celle dans les grains, croît significativement en présence d'excès de manganèse. Elle croît également dans les grains et les gaines en présence d'excès en bore, l'importance de cette accumulation diffère d'un sol à l'autre. L'effet positif du bore en excès est inhibé par l'excès du manganèse. Le manganèse en excès n'a pas d'effet sur l'absorption du magnésium, tandis que le bore en excès en a un effet positif.

- *Le phosphore* est absorbé davantage du sol sur alluvion, plus riche en phosphore total et extractible, que des deux autres sols. Il migre bien vers les grains où il est stocké. La concentration du phosphore diminue en fonction du stade de développement.

L'excès en manganèse décroît son absorption tandis que celui en bore la favorise ; l'effet de l'apport simultané du bore et du manganèse en excès n'est pas cumulatif. L'importance de ces effets est en relation avec les caractéristiques des sols.

- Le blé absorbe plus de *calcium* du sol sur alluvion (le plus riche) que des deux autres. L'élution et l'absorption sont en relation avec le calcium du complexe absorbant des sols étudiés. Le calcium s'accumule dans les limbes ; sa teneur dans les différents organes décroît en fonction du stade de développement.

Une fumure excessive soit en bore soit en manganèse semble curieusement avoir un effet variable d'un organe à l'autre sur l'accumulation de calcium : effet positif sur les grains, négatif sur les racines. Ceci inciterait à penser que l'excès pourrait perturber physiologiquement la répartition de cet élément dans les différents organes. L'excès simultané en bore et en manganèse n'a pas une influence cumultative.

- *Le cuivre* : L'élution et l'absorption par les plantes s'avèrent en relation étroite avec la force de retention des ions cupriques par le sol et avec le pH. Le cuivre absorbé par le blé paraît en relation avec la fraction éluée à l'eau et au DTPA. Il s'accumule dans les racines et semble peu mobile vers les parties aériennes.

Le manganèse est antagoniste du cuivre tandis que le bore est synergique.

La présence du bore à côté du manganèse diminue l'effet antagoniste de ce dernier. Il y a donc également un antagonisme entre bore et manganèse qui se répercute sur l'antagonisme manganèse-cuivre.

- Il en est de même pour *le fer*, bien que l'effet du pH soit plus important sur son élution et sur son absorption.

- *Le zinc* est plus absorbé par le blé du sol sur limon que du sol de rendzine et notamment du sol sur alluvion ; ceci est en relation avec le pH et la fraction fine (argile plus limon fin). Le zinc comme le cuivre s'accumule dans les racines. Son accumulation décroît en fonction du stade de développement.

La présence du manganèse en excès semble être antagoniste du zinc, l'antagonisme bore-zinc est plus net. L'effet du bore et du manganèse en excès simultané est additif sur l'accumulation du zinc dans les limbes.

- *Le bore* en excès s'accumule dans les limbes ; il est fortement retenu par les sols étudiés notamment celui de rendzine, étant très peu absorbé par les plantes et très peu extrait après les récoltes. Les résultats des expériences d'élution du sol et de culture nous conduisent à classer le sol sur limon et le sol sur alluvion comme suffisamment pourvus en bore ; le sol de rendzine est parmi les sols sur lesquels les plantes pourraient souffrir d'une carence. La cinétique de l'élution du bore varie d'un sol à l'autre en fonction des caractéristiques spécifiques de chacun.

L'étude a montré que le manganèse apporté diminuait la mobilité du bore et son absorption par les plantes. Ceci souligne l'importance de l'étude des interactions entre les éléments et en particulier les oligoéléments dans la nutrition des plantes. La fertilisation excessive en bore (aux doses 5,5 $\mu g.g^{-1}$ et 8 $\mu g.g^{-1}$) entraînerait une perturbation

importante, d'ordre physiologique. D'ailleurs à la dose de 8 $\mu g.g^{-1}$, on observe une augmentation brutale de la concentration dans les divers organes notamment dans les limbes.

Nous avons déterminé pour les trois sols des doses optimales (0,5 $\mu g.g^{-1}$), critique de toxicité (3 $\mu g.g^{-1}$) et très toxique (8 $\mu g.g^{-1}$), de même que les normes des teneurs correspondantes ; par exemple, pour les limbes ; elles sont respectivement de l'ordre de 80 $\mu g.g^{-1}$, de 140 $\mu g.g^{-1}$ et de 1150 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol sur limon. Le degré de toxicité varie d'un sol à l'autre.

- *Le manganèse* s'accumule dans les limbes. Le taux de son absorption par le blé est très faible (< 3 %), cette absorption augmente peu avec les doses appliquées. L'enrichissement des organes en fonction de cette application ne peut s'expliquer uniquement par l'excès apporté mais aussi par la réduction de la production de matière sèche.

Nous avons déterminé les doses optimales (1 $\mu g.g^{-1}$), critique de toxicité (6 $\mu g.g^{-1}$) des apports de manganèse dans les trois sols pour le blé, de même que les normes des teneurs correspondantes ; par exemple, pour les limbes : elles sont respectivement de l'ordre de 340 $\mu g.g^{-1}$ et de 420 $\mu g.g^{-1}$ dans le cas du sol sur limon. L'antogonisme manganèse-bore s'est manifesté aussi bien au cours des expériences d'élution du sol que de culture de blé. Dans cette étude nous avons discuté l'éventualité de certaines hypothèses concernant le rôle du manganèse en tant qu'élément de transition (avec les propriétés physico-chimiques fondamentales que lui confère cette position) dans les interactions manganèse-bore et manganèse et autres éléments. Cependant d'autres recherches sont nécessaires.

L'utilisation de manganèse marqué au ^{54}Mn radioactif a permis, en partant d'un composé chimique simple et bien défini, de suivre la cinétique de la radioactivité spécifique (RAS) des ions manganèse dans le sol au cours du temps sous l'effet d'élution des réactifs chimiques ; celle-ci (RAS) a montré que l'"autodiffusion" de ces ions est très faible et qu'il n'y avait pas de pool homogène entre le manganèse injecté et celui préexistant dans le sol ; de même qu'une partie > 80 % de manganèse injecté est fixé dans les premiers 10 centimètres du sol. La cinétique de la radioactivité spécifique conjuguée avec les résultats obtenus à partir de la culture de blé a montré que dans les meilleurs des

cas on ne peut discuter que d'une relation dans le même sens entre le manganèse absorbé par la plante et son extraction par un tel ou tel réactif. L'utilisation de ^{54}Mn dans des expériences de culture paraît prometteuse et doit permettre de mieux comprendre la nature des réactions chimiques à l'origine des interactions dont ce travail a montré l'importance ; il peut aussi aider à une meilleure compréhension du mécanisme d'extraction et d'absorption de cet élément et faire probablement ressortir une relation étroite entre son extraction et son absorption.

Tous ces résultats obtenus à partir des sols différents ont permis aussi de comprendre le problème de la fertilité oligominérale de ces sols et notamment celui sur alluvion provenant de la basse vallée de l'Euphrate très importante dans l'agriculture syrienne.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

ABADIA J., MONTANES L., HERAS L., 1981 - Effect of manganèse source on plant manganese in calcareous soils.
Anal. estation. Exp. Aula Dei., 15 (3-4) : 412-416.

ABO F., 1980 - Contribution à l'étude de l'assimilabilité des oligo-éléments par le blé (*Triticum aestivum L.*)
Thèse Doct. Ing. Université Paris VII, 169 p.

ABO F., PINTA M., 1982 - Influence des oligoéléments sur la production de matière sèche, l'aspect morphologique et le développement du blé (*Triticum aestivum L.* E.M. THELL).
C.R. Acad. Agric. Fr., 68 (10) : 756-765.

ADAMS R.M., 1964 - Boron, metallo-boron compounds and borones.
Interscience pub. John Wiley, New York, 97 p.

ADAM A.I., ANDERSON W.B., 1983 - Soil moisture influence on micronutrient cation availability under aerobic conditions.
Soil and Plant, 72 (1) : 77-80.

ADAMS M.J., KIRK BIGHT G.F., RIENVATANA P., 1975 - Molecular absorption spectra of some simple inorganic salts in the heated graphite atomizer.
Atom. Abs. Newsletter, 14 (5) : 105-108.

AGARWALA S.C., SHARMA P.N., CHATTERJEE C., SHARMA C.P., 1981 - Development and enzymatic changes during pollen development in boron deficient maize plants.
J. Plant. Nut., 3 (1-4) :329-336.

ALBERT L.S., 1965 - Ribonucleia acid content, boron deficiency symptoms, and elongation of tomato tips.
Plant Physiol., 40 : 649-652.

ALVA A.K., BILLE S.W., 1981 - Diagnostic technique for cereals based on plant analysis. I - Stage of plant development.
Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 12(12) : 1207-1225.

ANVERSA M., 1979 - Storunger der entwicklung höberer pflanzen durch unharmonische Bor-und calciumangebote und der Wert komplexer symptome fÜr die Diagnose.
Diss. Fu Berlin, 86 : 101-106.

A.O.A.C., 1980 - Symposium on standariziz methods for soil testing and plant analysis.
J. A.O.A.C., 63 (4) : 762-808.

ARORA C.L., SEKHON G.S., 1981 - Influence of soil characteristics on DTPA extractable micronutrient cation in some soil series of Punjab.
J. ind. Soc. Soil Sci., 29 (4) : 453-461.

ASGHAR M., KANEHIRO Y., 1981 - The fate of applied iron and manganese in an oxisol and an ultisol from Hawaii.
Soil sci. 131 (1) : 53-55.

ASO K., 1902 - On the physiological influence of manganese compounds on plants.
Bull. Coll. Agric. Tokyo, 5 : 177-185.

AUBERT G., 1985 - Les bases écologiques de l'aménagement régional. In P. LAMOTTE "L'apport de la pédologie dans l'aménagement régional", MASSON Paris, à paraître.

AUBERT H., PINTA M., 1971 - Les éléments traces dans les sols.
Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 11 : 98 p.

BAKER R.J., 1982 - Effect of seeding rate on grain yield, straw yield and harvest index of eight spring cultivars.
Canad. J. Plant Sci., 62 : 285-291.

BAKER D.E., LOW P.F., 1970 - Effect of the soil - gel transformation in clay - water systems on biological activity : II - Sodium uptake by corn seedling.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34 : 50-56.

BALIGAR V.C., NIELSEN N.E., BARBER S.A., 1979 - Kinetics of absorption on K, Rb and Cs from solution culture by intact plant roots.
J. Plant. Nut., 1 (1) : 25-37.

BAROCCIO A., MARIANI G., COLESATI F. et al., 1976 - Variation dans les teneurs en éléments minéraux de la plante, paraction de doses croissantes d'engrais azotés normaux et à lente cession, en *Triticum durum L.* 513-519 In :
4ème Coll. Intern. sur le contrôle de l'alimentation des plantes cultivées. COTTENIE A. (Ed.) Gent, II, 651 p.

BARTLETT R.J., PICARELLI C.J., 1973 - Availability of boron and phosphorus as affected by liming an acid potato soil.
Soil Sci., 116 : 77-83.

BERGER K.C., 1949 - Boron in soils and crops.
Advan. Agron., 1 : 321-336

BERGER K.C., TRUOG E., 1945 - Boron availability in relation to soil reaction and organic matter content.
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 10 : 113-116.

BERRY W.L., WALLACE A., 1981 - Toxicity : the concept and relationship to the dose response curve.
J. Plant Nut., 3 (1-4) : 13-19.

BERTRAND G., 1897 - Sur l'intervention du manganèse dans les oxidations provoquées par la laccase.
C.R. Acad. Sci. Paris, 124 : 1032-1035.

BERTRAND G., 1905 - Sur l'utilisation du manganèse comme engrais.
C.R. Acad. Sci. Paris, 26 : 1255-1257.

BERTRAND G., 1912 - Sur le rôle des infiniments petits en agriculture.
8 th Internat. Congr. Appl. Chem., 28 : 30-48.

BIGGAR J.W., MILTON F., 1960 - Boron adsorption and release by soils.
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 24 :115-119.

BINGHAM F.T., 1982 - Boron. 2nd Ed. 431-447. In A.L. PAGE et al. (Ed) Methods of soil analysis. Part. 2
. Am. Soc. Agron. Inc. Madison, USA, 1159 p.

BINGHAM F.T., GARBER M.J., 1970 - Zonal salinization of the root system with NaCl and boron in relation to growth and water uptake of corn plants.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34 : 122-126.

BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., COUVREUR F., 1976 - Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs.
Colloque I.T.C.F. : "Simplification du travail du sol en production céréalière". :239-280.

BOWEN J.E., 1969 - Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane tissue.
Plant physiol., 44 : 255-261.

BOYELDIEU J., 1980 - Les cultures céréalières.
Hachette, Paris, 255 p.

BRADFORD G.R., BAIR F.L., HUNSAKER V., 1971 - Trace and major element contents of soil saturation extracts.
Soil Sci., 112 : 225-230.

BRANDENBURG E., 1931 - Die Herz-und Trockenfäul der Rübenals Bormangel-Erscheinung.
Phytopath. Z., 3 : 499-517.

BROWN J.C., 1979 - Effect of boron stress on copper enzyme activity in tomato.
J. Plant Nut., 1 (1) : 39-53.

BROWN J.C., AMBLER J.E., 1970 - Further characterisation of iron in two genotypes of corn.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34 : 249-252.

BROWN J.C., AMBLER J.E., CHANEY R.L. et al., 1972 - Differential responses of plant genotypes to micronutrients. 389-417.In "Micronutrients in agriculture". J.J. MORVEDT, M. GIORDANO, W.L. LINDSAY.
Soil Sci. Soc. Amer. Inc. Madison, USA, 666 p.

BROWN J.C., CLARK R.B., 1977 - Copper as essential to wheat reproduction plant and soil, 48 : 509-523.

BURGEVIN H., FOEX E., 1937 - La maladie du coeur de la betterave en France.
C.R. Acad. Agric. France, :195-199.

BUSSLER W., 1974 - Microscopical and microchemical characteristics of deficiency diseases. Plant analysis and fertilizer problems.
Proc. of the 7th Internat. Coll., Hannover, : 83-92.

BUSSLER W., 1981 - Microscopical possibilities for the diagnosis of trace element stress in plants.
J. Plant. Nut., 3(1-4) : 115-128.

BYRON L., 1982 - Mechanisms for enhancing nutrient uptake in plants, with particular reference to mediterranean, south africa and western australia.
The Botanical Rev., 48(3) : 598-689.

CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M., 1982 - Minéralogie des argiles. 1- Structure et propriétés physico-chimiques.
2ème édit. MASSON, Paris, 184 p.

CARTWRIGHT B., TILLER K.G., ZARCINAS B.A., SPOUNCER L.R., 1983 - The chemical assessment of the boron status of soils.
Aust. J. Soil. Res., 21 : 321-332.

CERDA A., SALINAS R.M., ROMERO M., 1981 - Tolerancia del girasol (*Helianthus annus L.*) al boro.
Anal. Edafol. Agrobiol., 40 : 2245-2256.

CHATTERJEE A.K., MANDAL L.N., HALDAR M., 1982 - Interaction of zinc and phosphorus in relation to micronutrient nutrition of rice plant at two different growth stages.
Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 145 : 460-469.

CHAUSSAT R., LE DEUNFF Y., 1975 - La prédétermination physiologique des semences. 219-232. In "La germination des semences", Gauthier-Villars, Paris, 232 p.

CHAUSSAT R. et BUINOT D., 1984 - La prédétermination physiologique des semences de céréales.
C.R. Acad. Agric. Fr., 70(5) : 679-686.

CHUDE V.O., 1983 - Effect of zinc application on the dry matter yield uptake and distribution of zinc and other micronutrients in cocoa (*Theobroma cacao L.*).
Comm. Soil Sci. plant anal., 14(10) : 989-1004.

C.I.I., 1972 - Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux, détermination des éléments Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, et Cu par absorption atomique.
3ème Coll. Eur. Medit. contrôle Alim. plantes cult., Budapest, 159-172.

CLARKSON DLTL, SANDERSON J., 1978 - Sites of absorption and translocation of iron in barley roots.
Plant physiol., 61 : 731-736.

COIC Y., TENDILLE C., 1971 - Causes connues des variations quantitatives des oligoéléments dans les végétaux. B97 - B131, In "Oligoéléments et nutrition".
CNRS, Paris, B563 p.

COIC Y., LESSAINT Ch., CHOLET Y., 1974 - Accumulation comparée du cuivre dans les racines et parties aériennes de plantes fourragères en fonction de l'alimentation en cuivre et de la nature nitrique ou nitrico-ammoniacale de l'alimentation azotée.
C.R. Acad. Agric. Fr., :1162-1171.

COIC Y., LESSAINT Ch., GRANDJEAN M., 1982 - Comparaison de la composition minérale des noeuds et entre-noeuds de quelques graminées.
C.R. Acad. Agric. Fr., 68(14) : 1123-1127.

COKE L., WHITTINGTON W.J., 1968 - The role of boron in plant growth. IV - Interrelationships between boron and Indol-3-y L acetic acid in the metabolism of bean radicles.
J. Exp. Bot., 19 : 295-308.

COMBIER C., 1945 - Aperçu sur les climats de la Syrie et du Liban avec carte au 1/1.000.000ème des pluies et des vents.
Beyrouth, 61 p.

COME D., 1975 - Quelques problèmes de terminologie concernant les semences et leur germination. 11-26 In "La germination des semences"
Gauthier-Villars, Paris, 232 p.

(C.E.A. Commissariat à l'énergie atomique), 1978 - Statistique appliquée à l'exploitation des mesures.
MASSON, Paris, 2 tomes, 412 p.

CORY S., FINCH L.R., HINDE R.W., 1966 - The incorporation of ^{32}P phosphate into nucleic acids of normal and boron deficient boron roots.
Phytochemistry, 5 : 625-634.

COTTENIE A., 1981 - Trace elements in agriculture and in the environment.
Lab. anal. Agrochem. State Univ. Gent, Belgique, 73 p.

COUCH E.L., GRIM R.E., 1968 - Boron fixation by illite clays.
Clay miner., 16 : 249-256.

COX F.R., KAMPRATH E.J., 1972 - Micronutrient soil tests. 289-317. In J.J. MORTVEDT, P.M. GIORDAN, W. LINDSAY (Ed.) "Micronutrients in Agriculture",
Soil Sci. Soc. Amer. Inc. Madison, USA, 666 p.

CULVER R.B., SURLES T., 1975 - Interference of molecular spectra due to alkali halides in non-flame atomic absorption spectrometry.
Anal. Chem., 47(6) : 920-921.

DELAS J., POUGET R., 1984 - Action de la concentration de la solution nutritive sur quelques caractéristiques physiologiques et technologiques chez (*Vitis vinifera L.* c.v. "Cabernet-Sauvignon"). II - Composition minérale des organes végétatifs du moût et du vin.
Agronomie, 4(5) : 443-450.

DOSSO M., 1980 - Geochimie des sols sales et des eaux d'irrigation, aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie.
Thèse Docteur-Ingénieur, Toulouse, 181 p.

DRAGUN J., BAKER D.E., 1982 - Characterization of copper availability and corn seedling growth by a DTPA soil test.
Soil Sci. Soc. Amer. J., 46 : 921-925.

D'SOUZA T.J., MISTRY K.B., 1978 - The uptake, distribution and metabolic fate of ^{59}Fe, ^{58}Co, ^{54}Mn and ^{65}Zn in plants and their mobility and availability to crops in typical black and laterite soils.
Int. Symp. on the use of isotopes and radiation in research on soil plant relationships. INEA, FAO, Colombo, 11-15 Déc. 1978. 20 p.

DUBERTRET L., 1979 - Commission de la carte géologique du monde ; sous commission de la carte métallogénique, feuille n° 9, maquette lithologique.

DUGGER W.M., 1973 - Functional aspects of boron in plants. In KOTHNY E. (Ed.) "Advances in chemistry series", 123 : 112-129.

ELRASHIDI M.A., O'CONNOR G.A., 1982 - Boron sorption and desorption in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. J., 46(1) : 27-31.

EPSTEIN G., STOUT P.R., 1951 - The micronutrient cations ions, manganèse, zinc and copper : their uptake by plant from the absorbed state.
Soil Sci.,72 : 47-65.

EPSTEIN G., NORLYN J.D., RUSH D.W., et al., 1980 - Saline culture of crops : a genetic approach.
Science, 210 : 399-404.

EVANS M.C., SPARKS L.D., 1983 - On the chemistry and mineralogy of boron in pur and in mixed systems: A review.
Comm. Soil. Sci. Plant nal., 14(9) : 837-846.

EVENHUIS B., 1978 - Simplified methods for foliaire analysis.
Commun. 70.
Dep. Agric. Res. Koninklijk Instit. voor de Tropen, Amsterdam, 173 p.

FALES S.L., OHKI K., 1982 - Manganèse deficiency and toxicity in wheat : influence on growth and forage quality of herbage.
Agron. J., 74(6) : 1070-1073.

F.A.O., 1972 - Water use seminar, Damascus. Irrigation and drainage, 13, FAO, Rome, 312 p.

FARDEAU J.C., 1981 - Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse Doct. d'Etat. Univ. Paris VI, 198 p.

FINCK A., 1982 - Fertilizers and Fertilization. Introduction and practical guide to crop Fertilization. Verlag chemie, Weinheim, 438 p.

FISCHER G., BUSSLER W., 1984 - Mikrosymptome des Bor-Mangels an (*Mentha piperita L.*) Zeitschrift für pflanzenernährung und Bodenkunde, 147 (1) :13-20.

FLEMING G.A., 1980 - Essential micronutrients : Boron and Molybdenum 155-176. In E.B. DAVIES (Ed.) "Applied soil trace elements", J. WILEY and Sons, New York, 482 p.

FOLLETT R.H., MURPHY L.S., DONAHUE R.L., 1981 - Fertilisers and soil amendements. Prentice - Hall Inc. New Jersey, USA, 557 p.

FOY C.D., 1983 - The physiology of plant adaption to mineral stress. Iowa state J. Res., 57(4) : 355-391.

FOY C.D., CHANEY R.L., WHITE M.C., 1978 - The physiology of metal toxicity in plants. Annu. Rev. Plant. Physiol., 29 : 511-566.

FOY C.D., FLEMING A.L., SCHWARTZ, 1981b - Differential resistance of weeping lovegrass genotypes to iron related chlorosis. J. plant Nut., 3 : 537-550.

GAVALAS N.A., CLARK H.E., 1971 - On the rôle of manganese in photosynthesis. Kinetics of photoinhibition in manganese deficient and 3-(4-chlorophenyl) - 1,1-dimethylwrea-inhibited (*Euglena gracilis*). Plant Physiol., 47 : 139-143.

GENEVOIS L., 1971 - Les besoins d'oligoéléments chez les végétaux et les conséquences de leur carence. 205-230. In "Oligoélément et nutrition", C.N.R.S., B563.

GERLOFF G.C., 1963 - Comparative mineral nutrition of plants. Ann. Rev. Plant Physiol., 14 : 107-124.

GERSAR-SCET, 1976 - Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate. Avant-projet général provisoire, 417 p.

GESTRING W.D., SOLTANPOUR P.N., 1981 - Boron analysis in soil extracts and plant tissue by plasma emission spectroscopy. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal., 12(8) : 733-742.

GESTRING W.D., SOLTANPOUR P.N., 1984 - Evaluation of the amonium bicarbonate. DTPA soil test far assessing boron availability to alfalfa. Soil Sci. Soc. Amer. J., 48(1) : 96-99.

GOLDSCHMIDT V.M., 1935 - Les éléments traces dans les cendres de carbon. Ind. Eng. Chem. Anal., 7 : 1100-1102.

GOLDSCHMIDT V.M., 1954 - Géochemistry. Alex. Muir., Oxford, 730 p.

GORSLINE G.W., BAKER D.E., THOMAS W.I., 1965 - Accumulation of eleven elements by field corn (Zea mays L.) Penn. State Univ. exp. Bull., 725, 30 p.

GORSLINE G.W., THOMAS W.I., BAKER D.E., 1968 - Major gene inheritance of Sr-Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, B, Al-Fe, and Mn concentration in corn (Zea Mays L.). Penn. State Exp. Sta. Bull. 746, 47 p.

GRAHAM R.D., 1976 - Anormalous water relation in copper deficient wheat plants. Aust. J. Plant Physiol., 31 : 229-236.

GRANDALL P.C., CHAMBERLAIN J.D., GARTH J.K., 1981 - Toxicity symptoms and tissue levels associated with excess boron in pear trees. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal., 12 (10) : 1047-1057.

GRAVES C.J., STUCLIFF J.E., 1974 - Effect of copper deficiency on the initiation and development of flower buds of *Chrysanthamum monifolium* grown in solution culture. Ann. Bot. 38 : 729-738.

GRIS E., 1843 - De l'action des composés ferrugineux sur la végétation C.R. Acad. Sci. Paris, 17 : 679-682.

GUPTA U.C., 1971 - Boron and molybdenum nutrition of wheat barley and oats grown in prince Edward Island soils. Can. J. Soil Sci., 51 : 415-422.

GUPTA U.C., 1979 - Boron nutrition of crops. Adv. Agron., 31 : 273-306.

GUPTA U.C., MACKAY D.C., 1968 - Crop response to applied molybdenum nutrition of crop plants. Canad. J. Soil Sci., 48 : 235-242.

GUPTA U.C., MACLEOD J.A., 1981 - Plant and soil boron as influenced by soil pH and calcium sources on podzol soils. Soil Sci. 131(1) : 20-25.

HALDAR M., MANDAL L.N., 1982 - Cu x Mn interaction and the availability of Zn, Cu, Fe, Mn and P in waterlogged rice soils. Plant and soil, 69 : 131-134.

HALVIN J.L., SOLTANPOUR P.N., 1980 - Anitric acid plant tissue digest method for use with inductivity coupled plasma spectrometry. Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 11 : 969-980.

HAMILTON E.I., 1980 - Analysis for trace elements I : sample treatment and laboratory quality control, 21-68. In. E.B. DAVIES (Ed.). "Applied soil trace elements". J. WILEY and Sons, New York, 482 p.

HARBORNE J.B., 1973 - Phytochemical methods
Chapman and Hall. Londres, 278 p.

HAROUN A.F.T., HAMMOUDA F.M., HAMDI Y. et al., 1978 - Effect of manganese and cobalt on nodulation, dry weight and nitrogen content of soybean plants grown on calcareous soils.
Agric. Res. Rev. 65 (4) : 171-181.

HEENAN D.P., CAMPBELL L.C., 1981 - Soybean (*Glycine max*) nitrate reductase activity influenced by manganese nutrition.
Plant Cell. Physiol., 21(4) : 731-736.

HEENAN D.P., CAMPBELL L.C., 1983 - Manganese and iron interactions on their uptake and distribution in soybean (*Glycine max* L.) Merr.).
Plant and Soil, 70 : 317-326

HELLER R., 1977 - Physiologie végétale. I - Nutrition.
Masson, Paris, 244 p.

HELYAR K.R., 1978 - Effects of aluminium and manganese toxicity on legume growth. 207-231. In C.S. ANDREW, E.J. KAMPRATH (Eds). "Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils".
Melbourne, Australie, 316 p.

HEM J.D., 1963 - Chemical equilibria and rates of manganese oxidation.
U.S. Geol Survey water supply paper. 1667-B, 42 p.

HETIER J.M., FARDEAU J.C., 1977 - Estimation du fer mobile et assimilable des sols par dilution isotopique.
Sci. Sol, 4 : 231-244.

HEWITT E.J., 1952 - Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. C.A.B. England, 241 p.

HEWITT E.J., 1963 - The essential nutrient elements : requierement and interactions in plants. 137-360 . In F.C. STEWARD (Ed) "Plant physiology" III. Inorganic nutrition of plants. Acad. Press.
New York, 811 p.

HILL W.E., MORRILL L.G., 1974 - Assessing boron needs for improving peanut yield and quality.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38 : 791-794.

HILLEBRAND W.F., 1919 - U.S. Geol. Survey Bull. 700, 32 p. (cité par HAMILTON, 1980)

HINGSTON F.J., 1964 - Reactions between boron and clays.
Austr. J. Soil. Res., 2 : 83-95.

HIRSCH A.M., TORREY J.G., 1980 - Ultrastructural changes in sun flower root cells in relation to boron deficiency and added auxin.
Can. J. Bot., 58 : 856-866.

HODGSON J.F., 1963 - Chemistry of the micronutrients elements in soil.
Adv. Agron. 15 : 119-159.

HOLMES D.P., 1973 - Effect of defoliation on chlorophyll loss in senescing wheat inflorescences and on grain maturation.
Can. J. Plant Sci., 53 (3) : 499-500.

HORST W., 1976 - Einfluss von silizium auf die Mangan-Toleranz von Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris L.*) Dess. Fu Berlin, 83 (9) : 112-121.

HOULT D.W., BEATY M.M., WALLACE G.F., 1980 - Automated, sequential, multielement analysis of agricultural samples by inductively coupled plasma emission spectroscopy.
Atomic spectros., 1 : 157-162.

IWAHASHI M., TACHIBANA Y., OHITA Y., 1982 - Accumulation of calcium , magnesium, potassium and sodium with growth of individual leaves, petioles and stem of concumber plants.
Soil Sci. Plant Nut.,24 (4) : 441-449.

JARRELL W.M., BEVERLY R.B., 1982 - The dilution effect in plant nutrition studies.
Adv. Agron., 34 : 197-224.

JOHNSON R.C., KANEMASU E.T., 1982 - The influence of water availability on winter wheat yields.
Can . J. Plant Sci., 62 : 831-838.

JONES J.B.J., 1972 - Plant tissue analysis for micronutrients. 319-346.
In J.J. MORTVEDT, M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds), "Micronutrients in agriculture".
Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison, USA, 666 p.

JONES H.E., SCARSETH G.D., 1944 - The calcium-boron balance in the plants as related to boron needs.
Soil Sci., 57 :15-24.

JONES J.B.J., MEDERSKI H.J., 1964 - Effect of time and soil moisture level on the mineral composition of field grown soy bean plants.
Agron. Abstr. Amer. Soc. Agron. Madison, USA, 32 p.

JONES W.F., NELSON L.E., 1978 - Response of field grown soybeans to lim.
Comm. Soil Sci. Plant Anal., 9 : 607-614.

JONES W.F., NELSON L.E., 1982 - The effect of Mn on growth of Turnips and soybeans in the greenhouse.
Comm. in Soil Sci. Plant Anal., 13 (2) : 113-126.

JOSHI D.C., DHIR R.P., GUPTA B.S., 1983 - Influence of soil parameters on DTPA extractable micronutrients in arid soils.
Soil and Plant, 72 (1) : 31-38.

JUSTE C., 1983 - Problèmes posés par l'évaluation de la disponibilité pour la plante des éléments-traces du sol et de certains amendements organiques.
Sci. Sol., 2 : 109-122.

KEREN R., MEZUMAN U., 1981 - Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation clays.
Clay mineral, 29 : 198-204.

KHAN M.I., RYAN J., 1978 - Manganese availability of calcareous soils of Lebanon.
Agron. J., 70 (3) : 411-414.

KING P.M., ALSTON A.M., 1975 - Diagnosis of trace element deficiencies in wheat on eyre peninsula south Australia. 339-352. In J.D. NICHOLAS, A.R. EGAN (Eds). "Trace elements in soil-plant-animal systems".
Acad. Press. New York, 431p.

KLIMASEVSKI E.L., 1974 - Problema genotipicesko; specifiki kornevogo potanija rastenii (The problem of genotypic specificity of plant root nutrition). In "Sorti vdobrenie. A.N.S.S.S.R., Irkutsk, :11-54.

KNEZEK B.D., ELLIS B.G., 1980 - Essential micronutrient IV - Copper, Iron, Manganese and Zinc, 259-286, In B.E. DAVIES (Ed.) "Applied soil trace elements". WILEY and Sons, New York, 482 p.

KORTE N.E., SKOPP J., FULLER W.H. et al., 1976 - Trace elements movement in soils : Influence of soil physical and chemical properties.
Soil Sci., 122 : 350-359.

KOWALENKO C.G., 1984 - The necessity of washing filbert leaves for macro-and micronutrient considerations.
Can. J. Soil Sci., 64 (1) : 147-149.

KRAKKAI I., NAGY A.Z., 1980 - Boron determination in plant samples by ^{10}B (n, α) nuclear reaction. ESNA, rapport. Reunion annuelle Groupe de travail : relations sol. Plant : 26-28.

KRAUSKOPF B.K., 1972 - Geochemistry of micronutrients 7-36. In J.J. MORTVEDT M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds), "Micronutrients in agriculture".
Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison, USA, 666 p.

KUBOTA J., BERGER K.C., TRUOG E., 1948 - Boron movement in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 13 : 130-134.

KURDI F., DONER H.E., 1983 - Zinc and copper sorption and interaction in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. J., 47 (5) : 873-876.

LAUGHLIN M., SMITH R.G., PETERS M.A., 1981 - Sulfur, manganese, molybdenum and magnesium influences on bromegrass forage yield and composition in south central Alaska.
Comm. Soil Sci. Plant Anal., 12 (4) : 299-317.

LINDSAY W.L., 1972 - Inorganique phase equilibria of micronutrients in soils. 41-57. In J.J. MORTVEDT, M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds), "Micronutrients in agriculture". Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, USA, 666 p.

LINDSAY W.L., NORVELL W.A., 1978 - Development of a DTPA soil test for Zinc, iron, manganese and copper.
Soil Sci. Soc. Amer. J., 42 : 421-428.

LINK L., 1975 - Barley faces problems from manganese toxicity. Southeast farm press New Paper, Juin 25, Clarksdale, Mississipi, : 31-36.

LINK L., 1979 - Critical pH for the expression of manganese toxicity in burley tobacco and the effect of liming on growth. Tobacco Int., 181 : 50-52.

LIPMAN C.B., MACKINNEY G., 1931 - Proof of the essential nature of copper for higher plants. Plant Physiol.,6 : 593-599.

LOHNIS M.P., 1937 - Plant development in the absence of boron. Meded. Landbouwhoogeschool, Wageningen, 41 : 3-36.

LONERAGAN J.F., 1968 - Nutrient requierements of plants. Nature, 220 : 1307-1308.

LONERAGAN J.F., 1983 - Response of plants to trace elements. 92-102. In H. ELLENBERG, K. ESSER, K. KUBITZKI et al., (Eds). "Progress in botany. 44". Spriger Verlag, Berlin, 468 p.

MALVOISIER P., 1981 - Le déroulement de l'organogenèse et de la croissance du maître brin du blé (*Triticum aestivum L.*) du semis à l'épiaison. Thèse Doct. es Science. Univ. Paris Sud-Orsay, 103 p.

MASK P.L., WILSON D.O., 1978 - Effect of Mn on growth, nodulation and nitrogen fixation by soybeans grown in the greenhouse. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 9 : 653-666.

MASLE-MEYNARD J., 1980 - L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse Doct. Ing. INA Paris-Grignon, 274 p.

MATHUR S.P., LEVESQUE M.P., 1983 - The effect of using copper for mitigating histosol subsidence on : 2. The distribution of copper, manganese, zinc and iron in an organique soil, mineral sublayers, and their mixtures in the context of setting a threshold of phytotoxic soil-copper. Soil Sci.,135 (3) : 166-176.

MAYNARD D.N., 1979 - Nutritional disorders of vegetable crops. Areview. J. Plant Nut., 1 (1) : 1-23.

MAZE P., 1914 - Influences respectives des éléments de la solution minérale sur le développement du maïs. Ann. Inst. Pasteur, 28 : 1-68.

MEHTA S.C., POONIA S.R., PAL R., 1984 - Adsorption and immobilization of zinc in calcium and sodium -saturated soils from a semiarid region, India. Soil Sci., 137 (2) : 108-114.

MICHAEL G., SCHULTZ R., WAGNER H., 1969 - Modellversuche zur Bedeutung der Granne für die Versorgung des Gerstenkornes mit Cytokininen. Flora A 160 : 306-316.

MILILKAN C.R., 1947 - Effect of molybdenum on the severity of toxicity symptoms in flax induced by an excess of either manganese, zinc, copper, nickel or cobalt in the nutrient solution. J. Aust. Inst. Agr. Sci., 13 : 180-186.

MITCHELL R.L., 1944 - The distribution of trace elements in soils and grasses. Proc. Nut. Soc., 1 : 183-189.

MOHAPATRA P.K., ASPINALL D., JENNER C.F., 1982 - The growth and development of wheat apex : The effects of photoperiod on spikelet production and sucrose concentration in the apex. Ann. Bot., 49 : 619-626.

MONNIER G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Ann. Agron., 16(4) : 327-400.

MORAGHAN J.T., RALOWIEZ P., 1979 - Relative responses of four flax differential lines to Fe EDDHA. Crop Sci., 19 : 9-11.

MORAGHAN J.T., FREEMAN T.J., WHITED D.A., 1980 - Bragg soybeans develop abnormality. Crops and soils, 32 (5) : 18-19.

MOSES L.E., OAKFORD R.V., 1963 - Tables of random-permutation. Stanford Univ. Press., 233 p.

MURALI V., AYLMORE A.G., 1983 - Competitive adsorption during solute transport in soils : 3 - A review of experimental evidence of competitive adsorption and an evaluation of simple competition models. Soil Sci., 136 (5) : 279-290.

MURPHY L.S., WALSH L.M., 1972 - Correction of micronutrient deficiencies with fertilizers. 347-387 . In J.J. MORTVEDT, P.M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds). "Micronutrients in agriculture". Madison USA, 666 p.

NALOVIC L., 1977 - Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols. Thèse d'Etat Univ. Paris VI. Travaux et Documents n° 66 ORSTOM - 235 p.

NIELSON J.M., FRIIS-NIELSON B., 1976 - Evaluation and control of nutritional status of cereals. I : Dry matter weigh level. plant and soil, 45 : 317-338.

NIELSON N.E., SORENSEN C.B., 1984 - Macro nutrient cation uptake by plants. I : Rate-determining step in net in flow of cations into intact and decapitated sunflower plants and intensity factors of cations in soil solution. Plant and soil, 77 (2-3) : 337-346.

NORVELL H.F., 1972 - Equilibria of metal chelates in soil solution. 115-136. In J.J. MORTVEDT, M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds), "Micronutrients in agriculture". Soil. Sci. Soc. Am. Inc., Madison, USA, 666 p.

OHKI K., 1981 - Manganese critical levels for soybean growth and physiological processes.
J. Plant Nut., 3 (1-4) : 271-284.

OHKI K., 1984 - Manganese deficiency and toxicity effects on growth, development and nutrient composition in wheat.
Agron. J., 76 (2) : 213-218.

OKAZAKI E., CHAO T.T., 1968 - Boron adsorption and desorption by some Hawaiian soils.
Soil Sci., 105 : 255-259.

OLSEN S.R., 1972 - Micronutrient interactions. In J.J. MORTVEDT, P.M. GIORDANO, W.L. LINDSAY (Eds). In "Micronutrients in agriculture".
Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison USA, 666 p.

PADMANABHAM M., 1983 - Comparative study of the adsorption-deserption behaviour of copper (II), zinc (II), cobalt (II) and lead (II) at the goethite-solution interface.
Aust. J. Soil Res., 21 (4) : 515-525.

PANSU M., 1983 - SPCLAS : Un logiciel basic pour le calcul, le classement, la gestion des résultats d'un laboratoire d'analyse physico-chimique.
ORSTOM, Bondy, France, 60 p.

PATIL J.D., PATIL N.D., 1981 - Effect of calcium carbonate and organique matter on the growth and concentration of iron and manganese in sorghum (*Sorghum bicolor*). Plant and soil, 60 (2) : 295-300.

PARFITT R.L., 1978 - Anion adsorption by soils and soil materials.
Adv. Agron., 30 : 1-50.

PERALTA F., BORNEMISZA E., ALVARADO A., 1981 - Zinc adsorption by andepts from the central plateau of Costa.
Comm. Soil Sci. Plant Anal., 12 : 669-682.

PETERSON L.A., NEWMAN R.C., 1976 - Influence of soil pH on the availability of added boron.
Soil Sci. Soc. Amer. J., 40 : 280-282.

PINTA M., 1962 - Recherche et dosage des éléments tracés.
DUNOD, Paris, 726 p.

PINTA M., et C.I.I., 1975 - Etalons végétaux pour l'analyse foliaire.
Analusis, 3(6) : 344-353.

PINTA M., 1978 - Modern methods for trace element analysis.
Michigan Ann. Arbor Sci., : 492-498.

PINTA M., RIANDEY C., 1975 - Etude physico-chimique du mécanisme de l'atomisation thermoélectrique et de ses perturbations.
Analusis, 3 (2) : 86-93.

PINTA M. et collaborateurs, 1979 - Spectrométrie d'absorption atomique. Applications à l'analyse chimique. Tome I, 2ème édition, MASSON, ORSTOM, Paris, 259 p.

POLLARD A.S., PARR A.J., LOUGHMAN B.C., 1977 - Boron in relation to membrane function in higher plants.
J. Exp. Bot., 28 : 831-841.

PRASAD M., BYRNE E., 1975 - Boron source and lime effects on the yield of three crops grown in peat.
Agron. J., 67 : 553-556.

RACHIDIAN-KAFASHIAN Z., 1979 - Recherches sur l'origine de l'hétérogénéité de la germination des grains de blé (*Triticum aestivum L.*).
Thèse 3ème cycle. Univ. Paris 6, 101 p.

RAWSON H.M., 1971 - Tillering patterns in wheat with special reference to the shoot at the coleoptile node.
Aust. J. Biol. Sci., 24 : 829-841.

REAY P.F., WAUGH C., 1981 - Mineral-element composition of *Lupinus albus* and *Lupinus angustifolius* in relation to manganese accumulation.
Plant and Soil, 60 (3) : 435-444.

REDSHAW E.S., GAUDIEL R., 1982 - Growth stage changes in the elemental composition, protein, fiber and in vitro digestibility of fababean plants.
Comm. Soil Sci. Plant Anal., 13 (8) : 645-665.

REISENAUER H.M., WALSH L.M., HOEFT R.G., 1973 - Testing soils for sulphor, boron, molybdenum and chlorine · 173-200 . In L.M. WALSH, J.D. BEATON (Ed.). "Soil Testing and Plant Analysis".
Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison USA, 491 p.

RICHARDS L.A., 1954 - Diagnosis and improvement of saline and sodic soils.
U.S. Dep. Agric. Hand Book, 60, 160 p.

ROBIN D.G., PEARCE D.T., 1979 - The sensitivity of hexaploïd and octaploïd triticales and their parent species to copper deficiency.
Aust. J. Agr. Res., 30 (5) : 791-799.

ROBINS W.R., 1946 - Growing plants in sand culture for experimental purposes.
Soil Sci., 62 : 3-15.

RÖMHELD V., MARSCHNER H., 1979 - Fine regulation of iron uptake by the Fe-efficient plant (*Helianthus annus*), 405-417. In J.L. HARVEY, R. SCOTT-RUSSELL (Ed)."The soil-root interface".
Acad. Press. Londres, 448 p.

RUMPEL J.B., ELLIS B.G., DAVIES J.F., 1967 - Yield and manganese content of several green house grown vegetables as affected by appli-application of manganese, iron and lime.
Mich. Agr. Exp. Stat. Quart. Bul., 49 : 394-403.

RUSSELL E.W., 1961 - Soil conditions and plant growth.
Jarrold, Norwich, 668 p.

RYAN P., LEE J., PEEBLES T.F., 1967 - Trace element problems in relation to soil units in Europe.
FAO, Rome. World soil Resources Report 31, 42 p.

SALINAS R.M., CERDA A.A., FERNANDEZ F.G., 1982 - Effecto del boro sobre la composicion mineral de guisante y pimiento.
Anal. Edaf. Agrobiol., 41 (5-6) : 991-1001.

SARIC M.R., 1983 - Theoretical and practical approaches to the genetic specificity of mineral nutrition of plants.
Plant and Soil., 72 : 137-150.

SCHNEIDER E., PRICE C.A., 1962 - Decreased ribonucleic acid level : A possible cause of growth inhibition in zinc dificiency.
Biochim. Biophys. Acta, 55 : 406-408.

SEBILLOTTE M., 1978 - Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique.
C.R. Acad. Agric. Fr., 11 : 906-916.

SHERFINSKI J.H., 1975 - A graphite tube degradation study of barium at gunshot residue levels.
Atom. Abs. Newletter, 14 (1) : 26-28.

SHERRELL C.G., 1983 - Effect of boron application on seed production of New Zeeland herbage legumes.
N.Z.J. Exp. Agric., 11 : 113-117.

SHKOL'NIK M.Y., 1974 - General conception of the physiological role of boron in plants.
Fiziol. Rast., 21 : 174-186.

SHROTRI C.K., TEWARI M.N., RATHORE V.S., 1979 - Effect of zinc on chlorophyll, sugars and starch contents in maïs (*Zeamays L.*).
Indian J. Exp. Biol., 17 (1) : 58-60.

SHUMAN L.M., ANDERSON O.E., 1974 - Evaluation of six extractants for their ability to predict manganese concentration in wheat and soybeans.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38 : 788-790.

SHUMAN L.M., 1975 - The effect of soil properties on zinc adsorption by soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 39 : 454-458.

SHUMAN L.M., 1976 - Zinc adsorption isotherms for soil clays with and without iron oxides removed.
Soil Sci. Soc. Amer.J., 40 : 349-352.

SHUMAN L.M., 1977 - Adsorption of Zn by F and Al hydrous oxides as influenced by Aging and pH .
Soil Sci. Soc. Amer. J., 41 : 703-706.

SIDLE R.C., SOPPER W.E., 1976 - Cadmium distribution in foreste ecosystems irrigated with treated muncipal waste water and sludge.
J. Environ. Qual., 6 : 47-52.

SIDLE R.C., KARDOS L.T., VANGENUCHTEN M.T.H., 1977 - Heavy metals transport in a sludge treated soil.
J. Environ. Qual., 6 : 438-443.

SILLANPAA M., 1972 - Trace elements in soils and agriculture.
Soil Bul., 17, FAO, Rome, 67 p.

SINGH B.R., 1974 - Migration of ions in soils. II - Movement of Mn^{54} from surface application of manganese sulphate in soil columns.
Plant and soil, 41 : 629-636.

SMILEY H.H., 1976 - Manganese toxicity, major barley disease.
Southeast farm Press News-paper. Juillet 7. Clarksdale, Mississipi, : 33-39.

SMITH F.W., 1979 - Tolerance of seven tropical pasture grasses to excess manganese.
Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 10 : 853-867.

SMITH W.C., 1960 - Borax and borates. 103-122. In "Industrial minerals and rocks", Am. Inst. Mining Metallurg. Engineer.

SMITH D.A., DUGGER W.M., 1980 - Effect of boron deficiency on ^{86}rubidium uptake and photosynthesis in the diaton(*Cylindrotheca fusiformis*).
Plant Physiol., 66 : 692-695.

SOMNER A.L., LIPMAN C.B., 1926 - Evidence of the indispensable nature of zinc and boron higher green plants.
Plant physiol., 1 : 231-249.

SPENCER W.F., 1966 - Effect of copper on yield and uptake of phosphorus and iron by citrus seedlings grown at various phosphorus levels.
Soil Sci., 102 : 296-299.

SPIERS G.A., DUDAS M.J., HODGINS L.W., 1983 - Instrumental conditions and procedure for multielements analysis of soils and plant tissue by ICP-AES.
Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 14 (7) : 629-644.

STARK N., ZUURING H., 1981 - Predicting the nutrient retention capabilities of soils.
Soil Sci., 131 (1) : 9-18.

SWAINE D.J., 1955 - The trace element of soil.
Common. Bur. Soils. Teck. comm., 48, 157 p.

SWARUP A., 1982 - Availability of iron, manganese, zinc and phosphorus in submerged sodic soil as affected by amendements during the growth of rice crop.
Plant and Soil, 66 (1) : 37-43.

SZALAY A., 1980 - Retention of Mn and Cu by peat humic acids and micronutrient deficiency of plants and peat soils.
ESNA, Rapport - réunion annuelle - groupe de travail relations sol-plant, : 22-25.

TANADA T., 1978 - Boron-key element in the reactions of phytochrome and gravity.
Planta, 143 : 109-111.

TANADA T., 1983 - Localisation of boron in membranes.
J. Plant. Nut., 6 (9) : 743-749.

THOMAS J.D., MATHER A.C., 1979 - Manure and iron effects on sorghum growth on iron - deficient soil.
Agron. J., 71 : 792-794.

TRASSY C., MERMET J.M., 1984 - Les applications analytiques des plasmas
H.F., Lavoisier, Paris, 328 p.

TROCME S., 1973 - Oligoéléments autres que le fer.
Technique agricole, 5 : 3-10.

TSYPANOVA A.M., 1980 - Mobile manganese in superficialy gley tundra soils.
Soviet Soil Sci., 5 : 538-544.

TYLER L.D., Mc BRIDE M.B., 1982 - Mobility and extractibility of cadmium, copper, nickel, and zinc in organic and mineral soil columns.
Soil Sci., 134 (3) : 198-205.

VALLEE B.L., WACKER W.E.C., 1970 - metalloproteins. In. H. NEURATH (Ed.) "The proteins" (2nd ed.).
Acad. Press. New York, 5, 192 p.

VERLOO M., KIEKENS L., COTTENIE A., 1980 - Distribution patterns of essential and non essential trace elements in the soil-soil solution system.
Pedologie, 30 (2) : 163-175.

VIETS F.G., LINDSAY W.L., 1973 - Testing soils for zinc, copper, manganese and iron. 153-172. In L.W. WALSH, J.D. BEATON (Eds). "Soil testing and plant analysis, Soil Sci. Soc. Amer. Inc., Madison, USA, 491 p.

VINOGRADOV A.P., 1959 - The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils.
Consult. Bur. New York, 209 p.

VOSE P.B., 1982 - Effect of genetic factors on nutrition requierments of plants. In P.B. VOSE, S. BLIXT (Eds), "Contemporary bases for crop breeding".

WACKER W.E.C., 1962 - Nucleic acids and metals. III. Changes in nucleic acids, protein and metal content as a consequence of zinc deficiency in *Euglena gracilis*.
Biochim., 1 : 859-865.

WALLACE A., KINNEAR J., CHA J.W., ROMNEY E.M., 1980 - Effect of whashing procedures on mineral analyses and their cluster analyses for orange leaves.
J. Plant Nut., 2 : 1-8.

WALLACE A., ROMNEY E.M., HUNTER R.B., 1982 - Effects of washing on mineral composition of leaf samples of *Lycium andersonii*. Soil Sci., 134 (1) : 31-35.

WARINGTON K., 1923 - The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. Ann. Bot., 37 : 629-672.

WEAR J.I., 1965 - Boron. 1059-1063. In C.A. BLACK et al. (Eds). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9 : Am. Soc. Agron. Inc. Madison, USA, 1107 p.

WILCOX G.E., CANTLIFFE D.J., 1969 - Plant response to manganese source, rate and methode of application. Proc. Am. Soc. Hort. Sci., 94 : 354-356.

WILKINSON H.F., 1972 - Movement of micronutrients to plant roots. 139-169. In. J.J. MORTVEDT, P.M. GIORDANO, W.L. LINDSAY, (Eds). Soil Sci. Soc. Amer. Inc. Madison USA, 666 p.

WITTSTEIN A., APOIGIER F., 1857 - Ann. der Chem. U. Phar. (Liebig), 103, 362-364. (cité par FLEMING, 1980)

WOLF B., 1971 - The determination of boron in soil extracts, plants materials, composts, manures, water and nutrient solution. Soil Sci. Plant Anal., 2 (5)) : 363-374.

WOOD R.A., BERRY W.L., 1981 - A rapid scintigraphic technique for studycing the behavior of trace compounds in soil and plant systems. J. Plant Nut., 3 (1-4) : 153-161.

WOODHOUSE W.W., 1964 - Nutrient deficiencies in forage grasses. 181-218. In : H.P. SPRAGUE (Ed.) "Hunger signs in crops". D. Mc Kay, New York, 324 p.

YADAV O.P., MANCHANDA H.R., 1979 - Boron tolerance studies in gram and wheat grown on a sierozem sandy soil. J. Ind. Soc. Soil Sci., 27 : 174-180.

YLARANTA T., JANSSON H., SIPPOLLA J., 1979 - Season voriation in micronutrients contents of wheat. Ann. Agric. Fenniae, 18 (4) : 218-224.

ANNEXE

Moyennes, écarts-types et coefficients de variation (c.v. %) des teneurs en différents éléments nutritifs dans les divers organes du blé cultivé sur sol sur limon et sur sol de rendzine (r.)

- deuxième expérience -

Modalité	Colonne	Effectif	Moyenne	Ecart-type	C.V.%
1* B.511**	Mn/Li	3	309.834	8.585	2.771%
1 B.511	Mn/Ra	3	130.393	1.240	.951%
1 B.511	Mn/Gr	3	67.763	2.998	4.425%
1 B.511	Mn/Ga	3	212.353	7.467	3.516%
1 B.511	Mn/Ti	3	17.689	.529	2.993%
1 B.511	B/Li	3	79.390	2.499	3.148%
1 B.511	B/Ra	3	157.032	4.005	2.550%
1 B.511	B/Gr	3	4.687	.103	2.190%
1 B.511	B/Ga	3	52.400	1.670	3.188%
1 B.511	B/Ti	3	14.167	.451	3.183%
1 B.511	Fe/Li	3	287.857	14.994	5.209%
1 B.511	Fe/Ra	3	3736.67	142.24	3.81%
1 B.511	Fe/Gr	3	68.27	2.66	3.89%
1 B.511	Fe/Ga	3	364.98	11.82	3.24%
1 B.511	Fe/Ti	3	93.00	2.74	2.94%
1 B.511	Cu/Li	3	14.92	.75	5.03%
1 B.511	Cu/Ra	3	46.96	.28	.60%
1 B.511	Cu/Gr	3	5.47	.37	6.73%
1 B.511	Cu/Ga	3	6.91	.48	6.87%
1 B.511	Cu/Ti	3	3.73	.17	4.61%
1 B.511	Zn/Li	3	56.39	1.72	3.05%
1 B.511	Zn/Ra	3	84.55	3.44	4.06%
1 B.511	Zn/Gr	3	27.40	1.09	3.96%
1 B.511	Zn/Ga	3	55.95	2.43	4.33%
1 B.511	Zn/Ti	3	37.34	1.31	3.51%
1 B.511	P/Li	3	.401	.012	3.014%
1 B.511	P/Ra	3	.0736	.0034	4.5941%
1 B.511	P/Gr	3	.624	.027	4.330%
1 B.511	P/Ga	3	.0760	.0032	4.2048%
1 B.511	P/Ti	3	.0595	.0026	4.3471%
1 B.511	Mg/Li	3	.322	.010	3.229%
1 B.511	Mg/Ra	3	.0442	.0019	4.3695%
1 B.511	Mg/Gr	3	.182	.005	2.715%
1 B.511	Mg/Ga	3	.1004	.0055	5.4612%
1 B.511	Mg/Ti	3	.0428	.0015	3.5100%
1 B.511	Ca/Li	3	1.265	.101	7.987%
1 B.511	Ca/Ra	3	.466	.007	1.407%
1 B.511	Ca/Gr	3	.0508	.0007	1.2816%
1 B.511	Ca/Ga	3	.424	.011	2.496%
1 B.511	Ca/Ti	3	.294	.012	4.010%
1 B.511	K/Li	3	3.194	.013	.407%
1 B.511	K/Ra	3	.505	.017	3.272%
1 B.511	K/Gr	3	.685	.023	3.379%
1 B.511	K/Ga	3	2.393	.101	4.207%
1 B.511	K/Ti	3	.368	.006	1.513%
1 B.511	rMn/Li	3	196.043	3.391	1.730%
1 B.511	rMn/Ra	3	67.180	2.073	3.086%
1 B.511	rMn/Gr	3	28.833	1.051	3.644%
1 B.511	rMn/Ga	3	48.867	2.373	4.856%
1 B.511	rMn/Ti	3	10.887	.304	2.790%
1 B.511	rB/Li	3	45.43	1.93	4.24%
1 B.511	rB/Ra	3	53.19	2.68	5.03%

1	B.511	rB/Gr	3	3.70	.20	5.41%
1	B.511	rB/Ga	3	17.83	.31	1.71%
1	B.511	rB/Ti	3	7.90	.36	4.56%
1	B.511	rFe/Li	3	191.17	6.18	3.23%
1	B.511	rFe/Ra	3	2143.0	41.6	1.9%
1	B.511	rFe/Gr	3	55.33	1.06	1.91%
1	B.511	rFe/Ga	3	170.54	2.73	1.60%
1	B.511	rFe/Ti	3	147.68	1.59	1.08%
1	B.511	rCu/Li	3	11.65	.33	2.87%
1	B.511	rCu/Ra	3	28.55	.35	1.23%
1	B.511	rCu/Gr	3	3.82	.15	3.93%
1	B.511	rCu/Ga	3	5.03	.21	4.17%
1	B.511	rCu/Ti	3	3.35	.10	2.94%
1	B.511	rZn/Li	3	34.83	.28	.80%
1	B.511	rZn/Ra	3	42.51	2.03	4.78%
1	B.511	rZn/Gr	3	27.28	1.31	4.80%
1	B.511	rZn/Ga	3	42.63	.53	1.23%
1	B.511	rZn/Ti	3	30.08	1.45	4.81%
1	B.511	rP/Li	3	.378	.010	2.572%
1	B.511	rP/Ra	3	.0735	.0041	5.6307%
1	B.511	rP/Gr	3	.506	.009	1.682%
1	B.511	rP/Ga	3	.0721	.0023	3.2255%
1	B.511	rP/Ti	3	.0334	.0015	4.5386%
1	B.511	rMg/Li	3	.345	.008	2.373%
1	B.511	rMg/Ra	3	.413	.017	4.151%
1	B.511	rMg/Gr	3	.1767	.0021	1.1783%
1	B.511	rMg/Ga	3	.237	.011	4.698%
1	B.511	rMg/Ti	3	.1707	.0091	5.3167%
1	B.511	rCa/Li	3	1.341	.017	1.269%
1	B.511	rCa/Ra	3	.975	.014	1.384%
1	B.511	rCa/Gr	3	.0416	.0009	2.1366%
1	B.511	rCa/Ga	3	.829	.019	2.301%
1	B.511	rCa/Ti	3	.480	.013	2.803%
1	B.511	rK/Li	3	3.425	.040	1.159%
1	B.511	rK/Ra	3	.476	.019	3.992%
1	B.511	rK/Gr	3	.504	.013	2.511%
1	B.511	rK/Ga	3	3.411	.074	2.167%
1	B.511	rK/Ti	3	3.695	.080	2.162%
1	B.511	r/Gr	3	6.2851	.1715	2.7281%
1	B.511	r/Li	3	2.4504	.0992	4.0474%
1	B.511	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
1	B.511	r/Ga	3	1.9653	.0638	3.2458%
1	B.511	r/Ti	3	4.6281	.1494	3.2287%
1	B.511	b/Gr	3	4.9791	.1083	2.1748%
1	B.511	b/Li	3	2.5933	.0848	3.2695%
1	B.511	b/Ga	3	2.6300	.1107	4.2078%
1	B.511	b/Ti	3	4.4976	.1695	3.7697%
1	B.511	B(ap.)	3	.5	0.0	0.0%
1	B.511	Mn(ap.	3	1.0	0.0	0.0%
2	B311	Mn/Li	3	296.288	11.124	3.754%
2	B311	Mn/Ra	3	116.461	2.873	2.467%
2	B311	Mn/Gr	3	62.412	1.649	2.643%
2	B311	Mn/Ga	3	210.933	5.239	2.484%
2	B311	Mn/Ti	3	16.479	.417	2.528%
2	B311	B/Li	3	137.690	6.276	4.558%
2	B311	B/Ra	3	219.046	7.012	3.201%
2	B311	B/Gr	3	10.967	.866	7.893%
2	B311	B/Ga	3	86.023	1.528	1.776%
2	B311	B/Ti	3	31.080	1.010	3.248%
2	B311	Fe/Li	3	278.997	6.590	2.362%
2	B311	Fe/Ra	3	3633.50	164.33	4.52%
2	B311	Fe/Gr	3	65.53	2.74	4.19%
2	B311	Fe/Ga	3	346.65	5.41	1.56%
2	B311	Fe/Ti	3	86.23	2.17	2.51%

2	B311	Cu/Li	3	15.56	.82	5.27%
2	B311	Cu/Ra	3	55.98	1.20	2.14%
2	B311	Cu/Gr	3	5.01	.04	.83%
2	B311	Cu/Ga	3	5.61	.16	2.83%
2	B311	Cu/Ti	3	3.70	.34	9.20%
2	B311	Zn/Li	3	47.48	1.46	3.07%
2	B311	Zn/Ra	3	68.54	1.59	2.32%
2	B311	Zn/Gr	3	24.55	.36	1.48%
2	B311	Zn/Ga	3	49.78	2.12	4.26%
2	B311	Zn/Ti	3	37.72	1.56	4.13%
2	B311	P/Li	3	.441	.004	.917%
2	B311	P/Ra	3	.0573	.0020	3.5286%
2	B311	P/Gr	3	.514	.008	1.559%
2	B311	P/Ga	3	.0622	.0018	2.8790%
2	B311	P/Ti	3	.0322	.0011	3.5273%
2	B311	Mg/Li	3	.329	.015	4.600%
2	B311	Mg/Ra	3	.0460	.0020	4.3478%
2	B311	Mg/Gr	3	.174	.007	3.982%
2	B311	Mg/Ga	3	.1140	.0046	4.0198%
2	B311	Mg/Ti	3	.0411	.0014	3.3540%
2	B311	Ca/Li	3	.898	.024	2.652%
2	B311	Ca/Ra	3	.345	.010	2.765%
2	B311	Ca/Gr	3	.0475	.0017	3.5035%
2	B311	Ca/Ga	3	.464	.009	1.859%
2	B311	Ca/Ti	3	.401	.008	2.017%
2	B311	K/Li	3	3.349	.077	2.297%
2	B311	K/Ra	3	.439	.008	1.808%
2	B311	K/Gr	3	.624	.009	1.364%
2	B311	K/Ga	3	2.849	.070	2.442%
2	B311	K/Ti	3	.408	.009	2.209%
2	B311	rMn/Li	3	144.904	2.294	1.583%
2	B311	rMn/Ra	3	65.037	1.747	2.687%
2	B311	rMn/Gr	3	30.093	.945	3.141%
2	B311	rMn/Ga	3	52.040	1.634	3.140%
2	B311	rMn/Ti	3	8.147	.350	4.299%
2	B311	rB/Li	3	80.89	1.52	1.88%
2	B311	rB/Ra	3	92.43	2.22	2.40%
2	B311	rB/Gr	3	17.40	.56	3.20%
2	B311	rB/Ga	3	22.77	1.32	5.80%
2	B311	rB/Ti	3	11.10	.36	3.25%
2	B311	rFe/Li	3	180.13	8.24	4.57%
2	B311	rFe/Ra	3	2268.0	69.1	3.0%
2	B311	rFe/Gr	3	62.01	1.42	2.29%
2	B311	rFe/Ga	3	184.77	2.30	1.25%
2	B311	rFe/Ti	3	136.58	2.04	1.49%
2	B311	rCu/Li	3	10.69	.26	2.41%
2	B311	rCu/Ra	3	35.18	1.38	3.93%
2	B311	rCu/Gr	3	3.16	.09	2.87%
2	B311	rCu/Ga	3	4.87	.08	1.56%
2	B311	rCu/Ti	3	3.50	.10	2.86%
2	B311	rZn/Li	3	35.72	.95	2.66%
2	B311	rZn/Ra	3	41.74	2.60	6.23%
2	B311	rZn/Gr	3	30.93	1.85	5.97%
2	B311	rZn/Ga	3	43.56	1.37	3.14%
2	B311	rZn/Ti	3	34.20	.41	1.20%
2	B311	rP/Li	3	.454	.012	2.630%
2	B311	rP/Ra	3	.0933	.0020	2.1571%
2	B311	rP/Gr	3	.539	.018	3.281%
2	B311	rP/Ga	3	.0623	.0017	2.6475%
2	B311	rP/Ti	3	.0358	.0020	5.6075%
2	B311	rMg/Li	3	.452	.009	1.984%
2	B311	rMg/Ra	3	.346	.018	5.168%
2	B311	rMg/Gr	3	.1880	.0017	.9213%
2	B311	rMg/Ga	3	.217	.009	4.150%
2	B311	rMg/Ti	3	.0980	.0075	7.7039%

2	B311	rCa/Li	3	1.152	.041	3.601%
2	B311	rCa/Ra	3	.740	.022	2.938%
2	B311	rCa/Gr	3	.0382	.0009	2.2821%
2	B311	rCa/Ga	3	.803	.006	.693%
2	B311	rCa/Ti	3	.451	.013	2.899%
2	B311	rK/Li	3	3.227	.109	3.370%
2	B311	rK/Ra	3	.522	.014	2.763%
2	B311	rK/Gr	3	.473	.009	1.848%
2	B311	rK/Ga	3	3.008	.093	3.091%
2	B311	rK/Ti	3	3.354	.076	2.275%
2	B311	r/Gr	3	5.5478	.1302	2.3473%
2	B311	r/Li	3	2.1670	.0472	2.1774%
2	B311	r/Ga	3	1.7830	.0336	1.8856%
2	B311	r/Ga	3	1.7830	.0336	1.8856%
2	B311	r/Ti	3	3.4133	.0652	1.9089%
2	B311	b/Gr	3	3.8840	.0404	1.0392%
2	B311	b/Li	3	2.2053	.0380	1.7239%
2	B311	b/Ga	3	2.4167	.0509	2.1076%
2	B311	b/Ti	3	4.0592	.0697	1.7168%
2	B311	B(ap.)	3	3.0	0.0	0.0%
2	B311	Mn(ap.	3	1.0	0.0	0.0%
3	B.561	Mn/Li	3	400.040	7.429	1.857%
3	B.561	Mn/Ra	3	148.032	4.029	2.722%
3	B.561	Mn/Gr	3	86.432	3.346	3.871%
3	B.561	Mn/Ga	3	241.103	2.919	1.211%
3	B.561	Mn/Ti	3	27.303	.379	1.388%
3	B.561	B/Li	3	68.967	1.168	1.693%
3	B.561	B/Ra	3	163.523	3.488	2.133%
3	B.561	B/Gr	3	2.470	.173	7.024%
3	B.561	B/Ga	3	39.053	1.102	2.821%
3	B.561	B/Ti	3	11.633	.404	3.474%
3	B.561	Fe/Li	3	241.033	5.590	2.319%
3	B.561	Fe/Ra	3	4250.53	225.19	5.30%
3	B.561	Fe/Gr	3	66.29	.70	1.05%
3	B.561	Fe/Ga	3	308.84	6.96	2.25%
3	B.561	Fe/Ti	3	86.09	2.40	2.78%
3	B.561	Cu/Li	3	19.11	.71	3.72%
3	B.561	Cu/Ra	3	46.20	1.26	2.73%
3	B.561	Cu/Gr	3	6.26	.20	3.12%
3	B.561	Cu/Ga	3	4.51	.13	2.90%
3	B.561	Cu/Ti	3	3.81	.51	13.50%
3	B.561	Zn/Li	3	44.77	.62	1.39%
3	B.561	Zn/Ra	3	78.38	1.35	1.72%
3	B.561	Zn/Gr	3	29.44	.50	1.70%
3	B.561	Zn/Ga	3	45.44	.70	1.54%
3	B.561	Zn/Ti	3	30.54	.57	1.88%
3	B.561	P/Li	3	.389	.008	1.948%
3	B.561	P/Ra	3	.0517	.0011	2.1798%
3	B.561	P/Gr	3	.554	.010	1.885%
3	B.561	P/Ga	3	.0514	.0006	1.2150%
3	B.561	P/Ti	3	.0542	.0017	3.0651%
3	B.561	Mg/Li	3	.393	.003	.763%
3	B.561	Mg/Ra	3	.0400	.0020	5.0000%
3	B.561	Mg/Gr	3	.170	.004	2.382%
3	B.561	Mg/Ga	3	.1150	.0026	2.3007%
3	B.561	Mg/Ti	3	.0372	.0024	6.4593%
3	B.561	Ca/Li	3	.830	.009	1.039%
3	B.561	Ca/Ra	3	.403	.006	1.515%
3	B.561	Ca/Gr	3	.0372	.0009	2.3435%
3	B.561	Ca/Ga	3	.511	.006	1.113%
3	B.561	Ca/Ti	3	.338	.008	2.367%
3	B.561	K/Li	3	3.160	.049	1.552%
3	B.561	K/Ra	3	.439	.011	2.464%
3	B.561	K/Gr	3	.712	.008	1.169%
3	B.561	K/Ga	3	2.595	.081	3.133%
3	B.561	K/Ti	3	.350	.006	1.575%

3	B.561	rMn/Li	3	274.525	4.949	1.803%
3	B.561	rMn/Ra	3	94.743	1.990	2.100%
3	B.561	rMn/Gr	3	37.090	1.690	4.556%
3	B.561	rMn/Ga	3	77.373	2.087	2.697%
3	B.561	rMn/Ti	3	8.973	.369	4.116%
3	B.561	rB/Li	3	41.26	1.12	2.71%
3	B.561	rB/Ra	3	49.63	3.62	7.29%
3	B.561	rB/Gr	3	2.53	.15	6.03%
3	B.561	rB/Ga	3	11.27	.75	6.66%
3	B.561	rB/Ti	3	7.47	.45	6.04%
3	B.561	rFe/Li	3	136.83	2.70	1.97%
3	B.561	rFe/Ra	3	7341.0	9296.9	126.6%
3	B.561	rFe/Gr	3	46.86	1.63	3.47%
3	B.561	rFe/Ga	3	175.13	1.72	.98%
3	B.561	rFe/Ti	3	137.64	1.88	1.36%
3	B.561	rCu/Li	3	13.66	.21	1.52%
3	B.561	rCu/Ra	3	27.05	.98	3.63%
3	B.561	rCu/Gr	3	2.62	.15	5.55%
3	B.561	rCu/Ga	3	4.25	.12	2.85%
3	B.561	rCu/Ti	3	4.17	.10	2.28%
3	B.561	rZn/Li	3	38.33	.49	1.28%
3	B.561	rZn/Ra	3	46.43	.78	1.68%
3	B.561	rZn/Gr	3	34.42	2.04	5.93%
3	B.561	rZn/Ga	3	40.12	.43	1.07%
3	B.561	rZn/Ti	3	21.47	1.31	6.10%
3	B.561	rP/Li	3	.480	.018	3.750%
3	B.561	rP/Ra	3	.0439	.0019	4.2178%
3	B.561	rP/Gr	3	.470	.016	3.457%
3	B.561	rP/Ga	3	.0275	.0013	4.7516%
3	B.561	rP/Ti	3	.0650	.0042	6.4801%
3	B.561	rMg/Li	3	.345	.018	5.095%
3	B.561	rMg/Ra	3	.363	.020	5.575%
3	B.561	rMg/Gr	3	.1773	.0046	2.6046%
3	B.561	rMg/Ga	3	.241	.005	1.964%
3	B.561	rMg/Ti	3	.1373	.0038	2.7568%
3	B.561	rCa/Li	3	1.260	.022	1.707%
3	B.561	rCa/Ra	3	.869	.034	3.927%
3	B.561	rCa/Gr	3	.0451	.0013	2.9549%
3	B.561	rCa/Ga	3	.733	.015	2.010%
3	B.561	rCa/Ti	3	.431	.006	1.292%
3	B.561	rK/Li	3	3.515	.048	1.357%
3	B.561	rK/Ra	3	.397	.013	3.290%
3	B.561	rK/Gr	3	.505	.009	1.870%
3	B.561	rK/Ga	3	3.245	.072	2.204%
3	B.561	rK/Ti	3	4.244	.093	2.182%
3	B.561	r/Gr	3	6.1507	.1783	2.8989%
3	B.561	r/Li	3	2.2058	.0705	3.1939%
3	B.561	r/Ga	3	1.7867	.0306	1.7099%
3	B.561	r/Ga	3	1.7867	.0306	1.7099%
3	B.561	r/Ti	3	3.7667	.1110	2.9474%
3	B.561	b/Gr	3	3.8767	.0737	1.9012%
3	B.561	b/Li	3	2.0693	.0640	3.0948%
3	B.561	b/Ga	3	2.5457	.0460	1.8088%
3	B.561	b/Ti	3	3.5280	.1141	3.2328%
3	B.561	B(ap.)	3	.5	0.0	0.0%
3	B.561	Mn(ap.	3	6.0	0.0	0.0%
4	B8161	Mn/Li	3	407.834	5.376	1.318%
4	B8161	Mn/Ra	3	152.381	3.104	2.037%
4	B8161	Mn/Gr	3	89.549	1.025	1.144%
4	B8161	Mn/Ga	3	319.687	5.696	1.782%
4	B8161	Mn/Ti	3	38.684	1.674	4.326%
4	B8161	B/Li	3	285.447	9.572	3.353%
4	B8161	B/Ra	3	188.320	5.637	2.993%
4	B8161	B/Gr	3	27.613	1.778	6.441%
4	B8161	B/Ga	3	88.923	4.687	5.271%
4	B8161	B/Ti	3	66.567	2.467	3.705%

4	B8161	Fe/Li	3	165.647	5.338	3.222%
4	B8161	Fe/Ra	3	3748.57	198.59	5.30%
4	B8161	Fe/Gr	3	65.54	2.95	4.50%
4	B8161	Fe/Ga	3	372.88	11.60	3.11%
4	B8161	Fe/Ti	3	95.90	.68	.71%
4	B8161	Cu/Li	3	20.22	.40	1.98%
4	B8161	Cu/Ra	3	62.92	2.17	3.45%
4	B8161	Cu/Gr	3	4.20	.35	8.34%
4	B8161	Cu/Ga	3	4.13	.09	2.29%
4	B8161	Cu/Ti	3	5.19	.13	2.43%
4	B8161	Zn/Li	3	34.49	.82	2.38%
4	B8161	Zn/Ra	3	61.94	2.02	3.26%
4	B8161	Zn/Gr	3	29.50	.96	3.25%
4	B8161	Zn/Ga	3	53.46	.89	1.67%
4	B8161	Zn/Ti	3	36.67	1.42	3.88%
4	B8161	P/Li	3	.486	.019	3.989%
4	B8161	P/Ra	3	.0433	.0009	2.0939%
4	B8161	P/Gr	3	.614	.018	2.963%
4	B8161	P/Ga	3	.0641	.0016	2.5107%
4	B8161	P/Ti	3	.0405	.0013	3.2104%
4	B8161	Mg/Li	3	.301	.006	1.891%
4	B8161	Mg/Ra	3	.1180	.0020	1.6949%
4	B8161	Mg/Gr	3	.192	.005	2.677%
4	B8161	Mg/Ga	3	.0852	.0024	2.7750%
4	B8161	Mg/Ti	3	.0364	.0019	5.2534%
4	B8161	Ca/Li	3	.746	.033	4.457%
4	B8161	Ca/Ra	3	.342	.014	4.094%
4	B8161	Ca/Gr	3	.0538	.0009	1.5799%
4	B8161	Ca/Ga	3	.512	.010	1.896%
4	B8161	Ca/Ti	3	.361	.010	2.635%
4	B8161	K/Li	3	3.346	.137	4.088%
4	B8161	K/Ra	3	.473	.016	3.287%
4	B8161	K/Gr	3	.678	.018	2.645%
4	B8161	K/Ga	3	2.322	.095	4.096%
4	B8161	K/Ti	3	.323	.008	2.524%
4	B8161	rMn/Li	3	231.293	8.782	3.797%
4	B8161	rMn/Ra	3	88.600	2.227	2.514%
4	B8161	rMn/Gr	3	31.647	1.648	5.206%
4	B8161	rMn/Ga	3	59.977	1.652	2.754%
4	B8161	rMn/Ti	3	14.837	.983	6.628%
4	B8161	rB/Li	3	126.51	8.02	6.34%
4	B8161	rB/Ra	3	116.90	3.11	2.66%
4	B8161	rB/Gr	3	7.37	.15	2.07%
4	B8161	rB/Ga	3	56.77	1.10	1.93%
4	B8161	rB/Ti	3	21.57	.83	3.86%
4	B8161	rFe/Li	3	157.30	2.82	1.79%
4	B8161	rFe/Ra	3	1208.0	83.1	6.9%
4	B8161	rFe/Gr	3	69.36	2.26	3.26%
4	B8161	rFe/Ga	3	173.86	3.96	2.28%
4	B8161	rFe/Ti	3	123.38	1.01	.82%
4	B8161	rCu/Li	3	13.51	.58	4.31%
4	B8161	rCu/Ra	3	23.23	.96	4.13%
4	B8161	rCu/Gr	3	2.37	.09	3.65%
4	B8161	rCu/Ga	3	3.56	.07	1.84%
4	B8161	rCu/Ti	3	3.64	.09	2.44%
4	B8161	rZn/Li	3	40.62	.40	.98%
4	B8161	rZn/Ra	3	42.58	1.49	3.49%
4	B8161	rZn/Gr	3	37.05	1.45	3.93%
4	B8161	rZn/Ga	3	45.97	.46	1.01%
4	B8161	rZn/Ti	3	36.03	1.39	3.87%
4	B8161	rP/Li	3	.451	.016	3.483%
4	B8161	rP/Ra	3	.0742	.0014	1.8923%
4	B8161	rP/Gr	3	.547	.020	3.572%
4	B8161	rP/Ga	3	.0511	.0014	2.7157%
4	B8161	rP/Ti	3	.0294	.0009	3.2112%

4	B8161	rMg/Li	3	.453	.018	3.892%
4	B8161	rMg/Ra	3	.320	.011	3.558%
4	B8161	rMg/Gr	3	.1533	.0035	2.2904%
4	B8161	rMg/Ga	3	.246	.009	3.473%
4	B8161	rMg/Ti	3	.0733	.0023	3.1492%
4	B8161	rCa/Li	3	.849	.016	1.840%
4	B8161	rCa/Ra	3	.768	.022	2.909%
4	B8161	rCa/Gr	3	.0412	.0007	1.5779%
4	B8161	rCa/Ga	3	.939	.019	1.975%
4	B8161	rCa/Ti	3	.477	.015	3.038%
4	B8161	rK/Li	3	3.304	.141	4.253%
4	B8161	rK/Ra	3	.427	.016	3.812%
4	B8161	rK/Gr	3	.490	.009	1.784%
4	B8161	rK/Ga	3	3.496	.122	3.496%
4	B8161	rK/Ti	3	3.139	.146	4.666%
4	B8161	r/Gr	3	2.3200	.0462	1.9918%
4	B8161	r/Li	3	1.0438	.0288	2.7550%
4	B8161	r/Ga	3	1.8185	.0426	2.3434%
4	B8161	r/Ga	3	1.8185	.0426	2.3434%
4	B8161	r/Ti	3	1.7806	.0382	2.1432%
4	B8161	b/Gr	3	1.6743	.0628	3.7496%
4	B8161	b/Li	3	1.0667	.0253	2.3742%
4	B8161	b/Ga	3	1.3353	.0842	6.3054%
4	B8161	b/Ti	3	1.7933	.0888	4.9491%
4	B8161	B(ap.)	3	8.0	0.0	0.0%
4	B8161	Mn(ap.	3	16.0	0.0	0.0%
5	B811	Mn/Li	3	221.137	7.166	3.240%
5	B811	Mn/Ra	3	123.047	2.990	2.430%
5	B811	Mn/Gr	3	61.552	2.738	4.448%
5	B811	Mn/Ga	3	197.033	2.759	1.400%
5	B811	Mn/Ti	3	15.298	.543	3.550%
5	B811	B/Li	3	1096.767	50.313	4.587%
5	B811	B/Ra	3	390.830	4.415	1.130%
5	B811	B/Gr	3	81.663	.835	1.022%
5	B811	B/Ga	3	403.687	6.522	1.616%
5	B811	B/Ti	3	403.050	17.264	4.283%
5	B811	Fe/Li	3	285.087	4.148	1.455%
5	B811	Fe/Ra	3	3798.00	135.59	3.57%
5	B811	Fe/Gr	3	90.66	7.13	7.86%
5	B811	Fe/Ga	3	368.03	8.14	2.21%
5	B811	Fe/Ti	3	104.49	5.19	4.97%
5	B811	Cu/Li	3	9.67	.24	2.48%
5	B811	Cu/Ra	3	54.24	2.21	4.07%
5	B811	Cu/Gr	3	6.44	.39	6.01%
5	B811	Cu/Ga	3	5.18	.10	1.94%
5	B811	Cu/Ti	3	6.14	.10	1.61%
5	B811	Zn/Li	3	46.52	1.30	2.80%
5	B811	Zn/Ra	3	51.95	.90	1.73%
5	B811	Zn/Gr	3	23.18	1.27	5.48%
5	B811	Zn/Ga	3	37.58	.64	1.71%
5	B811	Zn/Ti	3	33.37	.79	2.37%
5	B811	P/Li	3	.741	.026	3.480%
5	B811	P/Ra	3	.0716	.0028	3.9493%
5	B811	P/Gr	3	.702	.019	2.728%
5	B811	P/Ga	3	.0732	.0013	1.7558%
5	B811	P/Ti	3	.0313	.0017	5.4402%
5	B811	Mg/Li	3	.386	.017	4.280%
5	B811	Mg/Ra	3	.0810	.0026	3.2664%
5	B811	Mg/Gr	3	.238	.007	3.030%
5	B811	Mg/Ga	3	.1243	.0059	4.7127%
5	B811	Mg/Ti	3	.0508	.0003	.6324%
5	B811	Ca/Li	3	.775	.027	3.436%
5	B811	Ca/Ra	3	.473	.010	2.039%
5	B811	Ca/Gr	3	.0578	.0060	10.3344%
5	B811	Ca/Ga	3	.547	.009	1.658%
5	B811	Ca/Ti	3	.504	.011	2.120%

5	B811	K/Li	3	2.873	.091	3.170%
5	B811	K/Ra	3	.517	.005	.893%
5	B811	K/Gr	3	.667	.008	1.135%
5	B811	K/Ga	3	2.307	.020	.873%
5	B811	K/Ti	3	.464	.006	1.188%
5	B811	rMn/Li	3	130.985	3.131	2.390%
5	B811	rMn/Ra	3	54.250	2.178	4.015%
5	B811	rMn/Gr	3	33.830	2.210	6.532%
5	B811	rMn/Ga	3	50.547	2.336	4.622%
5	B811	rMn/Ti	3	9.667	.483	5.000%
5	B811	rB/Li	3	879.54	10.97	1.25%
5	B811	rB/Ra	3	179.26	3.50	1.95%
5	B811	rB/Gr	3	86.63	.40	.47%
5	B811	rB/Ga	3	140.57	3.51	2.50%
5	B811	rB/Ti	3	38.37	1.46	3.80%
5	B811	rFe/Li	3	177.26	5.66	3.19%
5	B811	rFe/Ra	3	2170.7	79.5	3.7%
5	B811	rFe/Gr	3	74.50	2.22	2.98%
5	B811	rFe/Ga	3	176.72	4.64	2.63%
5	B811	rFe/Ti	3	124.48	1.15	.92%
5	B811	rCu/Li	3	8.80	.35	3.93%
5	B811	rCu/Ra	3	38.71	.84	2.18%
5	B811	rCu/Gr	3	6.04	.17	2.81%
5	B811	rCu/Ga	3	3.75	.24	6.52%
5	B811	rCu/Ti	3	5.28	.20	3.69%
5	B811	rZn/Li	3	41.13	1.49	3.63%
5	B811	rZn/Ra	3	32.24	1.68	5.22%
5	B811	rZn/Gr	3	41.77	2.71	6.49%
5	B811	rZn/Ga	3	51.56	2.25	4.37%
5	B811	rZn/Ti	3	40.42	1.13	2.80%
5	B811	rP/Li	3	.611	.008	1.236%
5	B811	rP/Ra	3	.0960	.0032	3.3480%
5	B811	rP/Gr	3	.623	.013	2.094%
5	B811	rP/Ga	3	.0842	.0014	1.6627%
5	B811	rP/Ti	3	.0260	.0008	2.9913%
5	B811	rMg/Li	3	.643	.023	3.587%
5	B811	rMg/Ra	3	.263	.013	5.027%
5	B811	rMg/Gr	3	.2213	.0110	4.9767%
5	B811	rMg/Ga	3	.126	.006	4.383%
5	B811	rMg/Ti	3	.0657	.0035	5.2487%
5	B811	rCa/Li	3	1.048	.043	4.122%
5	B811	rCa/Ra	3	.583	.012	2.097%
5	B811	rCa/Gr	3	.0401	.0008	2.0174%
5	B811	rCa/Ga	3	1.032	.016	1.508%
5	B811	rCa/Ti	3	.566	.012	2.136%
5	B811	rK/Li	3	2.920	.047	1.622%
5	B811	rK/Ra	3	.325	.010	2.954%
5	B811	rK/Gr	3	.577	.009	1.481%
5	B811	rK/Ga	3	3.109	.103	3.311%
5	B811	rK/Ti	3	3.309	.096	2.904%
5	B811	r/Gr	3	1.7202	.0350	2.0350%
5	B811	r/Li	3	1.0352	.0456	4.4089%
5	B811	r/Ga	3	.9550	.0219	2.2906%
5	B811	r/Ga	3	.9550	.0219	2.2906%
5	B811	r/Ti	3	1.9879	.0451	2.2695%
5	B811	b/Gr	3	1.3129	.0663	5.0471%
5	B811	b/Li	3	1.1467	.1282	11.1769%
5	B811	b/Ga	3	1.2480	.0461	3.6963%
5	B811	b/Ti	3	1.9997	.1596	7.9811%
5	B811	B(ap.)	3	8.0	0.0	0.0%
5	B811	Mn(ap.	3	1.0	0.0	0.0%
6	B.5161	Mn/Li	3	624.603	14.435	2.311%
6	B.5161	Mn/Ra	3	210.854	4.378	2.076%
6	B.5161	Mn/Gr	3	127.499	3.244	2.545%
6	B.5161	Mn/Ga	3	330.316	3.017	.913%
6	B.5161	Mn/Ti	3	48.030	.678	1.411%

6	B.5161	B/Li	3	62.217	.993	1.597%
6	B.5161	B/Ra	3	112.520	1.896	1.685%
6	B.5161	B/Gr	3	1.737	.071	4.085%
6	B.5161	B/Ga	3	73.690	1.711	2.322%
6	B.5161	B/Ti	3	28.897	1.271	4.400%
6	B.5161	Fe/Li	3	159.620	3.650	2.287%
6	B.5161	Fe/Ra	3	3163.73	116.26	3.67%
6	B.5161	Fe/Gr	3	54.35	1.99	3.66%
6	B.5161	Fe/Ga	3	256.70	6.22	2.42%
6	B.5161	Fe/Ti	3	79.56	2.34	2.94%
6	B.5161	Cu/Li	3	33.65	1.22	3.63%
6	B.5161	Cu/Ra	3	87.50	.86	.99%
6	B.5161	Cu/Gr	3	12.57	.39	3.06%
6	B.5161	Cu/Ga	3	3.60	.24	6.64%
6	B.5161	Cu/Ti	3	3.65	.18	4.87%
6	B.5161	Zn/Li	3	38.25	1.07	2.79%
6	B.5161	Zn/Ra	3	90.09	3.04	3.37%
6	B.5161	Zn/Gr	3	42.54	2.32	5.46%
6	B.5161	Zn/Ga	3	29.73	1.23	4.15%
6	B.5161	Zn/Ti	3	22.63	.71	3.15%
6	B.5161	P/Li	3	.368	.027	7.205%
6	B.5161	P/Ra	3	.0549	.0016	2.8394%
6	B.5161	P/Gr	3	.467	.034	7.223%
6	B.5161	P/Ga	3	.0557	.0015	2.6177%
6	B.5161	P/Ti	3	.0499	.0015	3.0787%
6	B.5161	Mg/Li	3	.299	.009	2.994%
6	B.5161	Mg/Ra	3	.0803	.0032	4.0015%
6	B.5161	Mg/Gr	3	.167	.006	3.666%
6	B.5161	Mg/Ga	3	.0927	.0027	2.8602%
6	B.5161	Mg/Ti	3	.0502	.0011	2.2227%
6	B.5161	Ca/Li	3	.991	.008	.801%
6	B.5161	Ca/Ra	3	.274	.006	2.233%
6	B.5161	Ca/Gr	3	.0364	.0007	2.0269%
6	B.5161	Ca/Ga	3	.315	.010	3.080%
6	B.5161	Ca/Ti	3	.305	.012	3.957%
6	B.5161	K/Li	3	3.740	.143	3.817%
6	B.5161	K/Ra	3	.435	.010	2.304%
6	B.5161	K/Gr	3	.669	.012	1.762%
6	B.5161	K/Ga	3	2.074	.063	3.032%
6	B.5161	K/Ti	3	.403	.005	1.223%
6	B.5161	rMn/Li	3	479.560	6.357	1.326%
6	B.5161	rMn/Ra	3	271.317	9.094	3.352%
6	B.5161	rMn/Gr	3	67.033	1.829	2.728%
6	B.5161	rMn/Ga	3	149.620	3.234	2.162%
6	B.5161	rMn/Ti	3	18.213	.723	3.968%
6	B.5161	rB/Li	3	38.67	1.72	4.45%
6	B.5161	rB/Ra	3	47.37	3.60	7.61%
6	B.5161	rB/Gr	3	2.93	.25	8.58%
6	B.5161	rB/Ga	3	13.80	.66	4.75%
6	B.5161	rB/Ti	3	6.40	.26	4.13%
6	B.5161	rFe/Li	3	81.14	3.74	4.61%
6	B.5161	rFe/Ra	3	1654.7	51.1	3.1%
6	B.5161	rFe/Gr	3	46.99	1.29	2.75%
6	B.5161	rFe/Ga	3	131.87	4.58	3.48%
6	B.5161	rFe/Ti	3	126.56	.79	.62%
6	B.5161	rCu/Li	3	15.80	.61	3.83%
6	B.5161	rCu/Ra	3	16.90	.73	4.31%
6	B.5161	rCu/Gr	3	1.67	.08	4.50%
6	B.5161	rCu/Ga	3	2.72	.09	3.17%
6	B.5161	rCu/Ti	3	2.99	.09	3.04%
6	B.5161	rZn/Li	3	44.62	.35	.78%
6	B.5161	rZn/Ra	3	55.62	1.10	1.97%
6	B.5161	rZn/Gr	3	48.15	1.64	3.41%
6	B.5161	rZn/Ga	3	37.56	1.89	5.03%
6	B.5161	rZn/Ti	3	25.36	.88	3.48%

6	B.5161	rP/Li	3	.378	.015	3.984%
6	B.5161	rP/Ra	3	.0623	.0015	2.3267%
6	B.5161	rP/Gr	3	.420	.014	3.299%
6	B.5161	rP/Ga	3	.0568	.0016	2.7331%
6	B.5161	rP/Ti	3	.0354	.0021	5.8136%
6	B.5161	rMg/Li	3	.296	.011	3.838%
6	B.5161	rMg/Ra	3	.357	.011	3.070%
6	B.5161	rMg/Gr	3	.1567	.0050	3.2127%
6	B.5161	rMg/Ga	3	.245	.014	5.758%
6	B.5161	rMg/Ti	3	.0830	.0026	3.1877%
6	B.5161	rCa/Li	3	.970	.024	2.476%
6	B.5161	rCa/Ra	3	.836	.010	1.199%
6	B.5161	rCa/Gr	3	.0599	.0021	3.5689%
6	B.5161	rCa/Ga	3	.684	.012	1.826%
6	B.5161	rCa/Ti	3	.458	.012	2.620%
6	B.5161	rK/Li	3	4.184	.142	3.403%
6	B.5161	rK/Ra	3	.467	.012	2.596%
6	B.5161	rK/Gr	3	.465	.013	2.893%
6	B.5161	rK/Ga	3	3.723	.107	2.872%
6	B.5161	rK/Ti	3	2.492	.063	2.528%
6	B.5161	r/Gr	3	2.5574	.1204	4.7068%
6	B.5161	r/Li	3	.9402	.0290	3.0858%
6	B.5161	r/Ga	3	1.0204	.0274	2.6855%
6	B.5161	r/Ga	3	1.0204	.0274	2.6855%
6	B.5161	r/Ti	3	2.2290	.1208	5.4188%
6	B.5161	b/Gr	3	1.4913	.0918	6.1560%
6	B.5161	b/Li	3	1.3347	.0660	4.9458%
6	B.5161	b/Ga	3	1.5056	.0796	5.2845%
6	B.5161	b/Ti	3	2.3595	.0613	2.5991%

:: Les chiffres de cette colonne représentent les numéros des traitements.

::: Le premier chiffre donne la dose de bore apportée ($\mu g.g^{-1}$) et le deuxième la dose de manganèse apportée ($\mu g.g^{-1}$).

MOTS CLES :

Bore - Manganèse - Oligoélément - Macro-élément - Blé - Sol sur limon - Sol de rendzine - Sol sur alluvion - Fertilité - Biomasse - Migrations - Développement végétal - échanges minéraux sols-plantes.

BREF RESUME:

A partir d'expériences de culture du blé en serre sur des échantillons de sols de régions tempérées (France) et aride (Syrie), on étudie l'effet du bore et du manganèse sur la fertilité des sols et la nutrition minérale du blé.
De multiples liaisons et interactions entre le bore et le manganèse et les autres éléments (majeurs et traces) sont mises en évidence dans les différents organes de blé. L'influence du bore et du manganèse sur les autres éléments est étudiée.
L'absorption, la migration et l'accumulation des éléments nutritifs dans la plantes et ses différentes parties font l'objet d'une étude détaillée.
Des relations entre les teneurs en éléments dans les différents organes de blé sont décelées.
La fertilité naturelle spécifique pour chaque sol a été établie ainsi que les seuils optima de fertilisation et seuils critiques de toxicité en bore et en manganèse.
La différence de comportement d'absorption des éléments nutritifs en relation avec les caractéristiques pédologiques de chaque sol, les doses de bore et de manganèse dans la fertilisation des sols sont recherchés.
L'effet toxique du bore et du manganèse sur certaines propriétés biologiques de la descendance du blé est étudié.
La rétention, la mobilité et l'échange des oligo-éléments ainsi que certains éléments majeurs dans ces sols sont déterminés au moyen de ^{54}Mn radioactif.