

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ DE PARIS VII

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTEUR INGÉNIEUR

par

ABO FOUAD

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'ASSIMILABILITE
DES OLIGO-ELEMENTS PAR LE BLE

(Triticum aestivum L.)

Soutenu le 4 décembre 1980 devant la Commission d'Examen :

MM. R.HELLER. Président

R.CHAUSSAT }
G.AUBERT } Examineurs
M. PINTA }

ERRATA

- Page 7, ligne 11 : lire SALM-HORSTMAR au lieu de SALMORSTUMER.
- Page 9 : lire "on s'est orienté, encore récemment,"
- Page 16, 1ère ligne : lire existant.
- Page 18, ligne 15 : lire "que celle sur sol mieux équilibré pour ..."
- Page 21 : ligne 3 du paragraphe 1.3.1. : lire "voir 1.3.2."
- Page 26, ligne 13 du paragraphe 1.4. : lire "du point de vue de son comportement et de son photopériodisme".
- Page 27, ligne 4 du paragraphe 1.5. : lire "pour étudier la possibilité ..."
ligne 1 du paragraphe 1.5.1. : lire "les graines ont été désinfectées en les immergeant ..."
- Page 34, ligne 2 du paragraphe 2.5.1. : lire "employée dans le domaine de la détermination des oligo-éléments ..."
- Page 38, ligne 1 : lire tout.
ligne 2 : lire "d'un certain nombre ..."
- Page 43, "Paramètres de dosage du cuivre" : lire point d'ébullition.
- Page 76 : modification du 2ème tableau (écart-type) comme ci-dessous.

Analyse sur l'ensemble des parties aériennes à la fin de l'essai.			
S.N.C. 1 à 8	39,87	0,397	0,158
Zn x 5 9 à 16	38,5	0,401	0,161
Fe x 3 17 à 24	34,1	0,413	0,171
B x 5 25 à 32	39,10	0,400	0,160
Mn x 5 33 à 40	33,06	0,417	0,174
Cu x 5 41 à 48	37,50	0,404	0,163

- Page 79, dernière ligne : lire "n'est pas significative".
- Page 128, ligne 13 : lire où.
- Page 132, ligne 5 : lire "Le zinc semble inhiber la migration du fer".
- Page 145, ligne 28 ; lire "comme l'ont trouvé ..."
dernière ligne : lire négatif.
- Page 158, dans paragraphe 5°) : lire apicale.
- Page 161, ligne 4 : lire SUGARCANE.

A MA PATRIE,

A MES PARENTS,

EN TÉMOIGNAGE DE MA PROFONDE RECONNAISSANCE.

AVANT-PROPOS.

En achevant cette étude, il m'est agréable de rendre hommage à tous ceux qui ont aidé à sa réalisation.

Mes très vifs remerciements vont tout d'abord à Monsieur le Professeur CAMUS, Directeur Général de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, qui a bien voulu m'accorder l'accès aux laboratoires des Services Scientifiques Centraux en vue de la préparation de cette thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur R.HELLER, Professeur à l'Université de PARIS VII, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse et qui a bien voulu me conseiller très utilement dans ce travail en me faisant profiter de sa large expérience.

J'adresse ma respectueuse reconnaissance à Monsieur M.PINTA, Directeur de Recherche à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, qui m'a accueilli dans son laboratoire et a bien voulu diriger cette thèse sans épargner son aide et ses conseils, m'aidant ainsi à résoudre les nombreux problèmes rencontrés.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur G.AUBERT, Inspecteur de Recherche en Pédologie à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail en faisant partie du jury.

Je remercie également Monsieur R.CHAUSSAT, Professeur à l'Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon, qui a accepté de participer au jury et de me donner la possibilité de bénéficier de ses profondes connaissances.

J'adresserai un hommage particulier à Madame R.BENAC, Maître de Recherche à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, qui ne m'a pas ménagé ses conseils très utiles.

Ma reconnaissance s'adresse également à Mademoiselle H.AUBERT qui m'a aidé dans la correction du manuscrit.

Je tiens à remercier vivement les personnes qui m'ont apporté leur collaboration dans l'accomplissement de ce travail :

Mesdames RICHARD, VILLETTE, ALPHONSE, Messieurs GAVINELLI et PANSU.

Enfin, je tiens à rendre hommage aux diverses personnes de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer et de l'INRA qui m'ont facilité l'exécution de cette étude, en particulier à Monsieur S.TROCME.

LISTE DES ABREVIATIONS.

- Fe-EDTA : Acide éthylène diamino-tétracétique.
- Fe-DTPA : Diéthylène tiamino-pentaacétique.
- Fe-EDDHA : Ethylène diamine di (o-hydroxy phénylacétique).
- S.N.C. : Solution nutritive complète (contenant les éléments majeurs et les oligo-éléments).
- S.N.M. : Solution nutritive ne contenant que les éléments majeurs et le fer.
- S.N.C. + Zn_{x5} : Solution nutritive complète avec une concentration en zinc cinq fois plus forte que la S.N.C.
- S.N.C. + Mn_{x5} : Solution nutritive complète avec une concentration en manganèse cinq fois plus forte que la S.N.C.
- S.N.C. + B_{x5} : Solution nutritive complète avec une concentration en bore cinq fois plus forte que la S.N.C.
- S.N.C. + Cu_{x5} : Solution nutritive complète avec une concentration en cuivre cinq fois plus forte que la S.N.C.
- S.N.C. + Fe_{x3} : Solution nutritive complète avec une concentration en fer trois fois plus forte que la S.N.C.

TABLE DES MATIERES.

AVANT-PROPOS.

LISTE DES ABREVIATIONS.

INTRODUCTION	1
1. Données bibliographiques	2
1.1. Importance des oligo-éléments dans les sols et les plantes	3
1.2. Importance des oligo-éléments dans la fertilité des sols	5
1.3. Evolution des études des oligo-éléments en culture hydroponique	6
1.4. Etat actuel des travaux sur les oligo-éléments étudiés (Fe, Cu, Zn, Mn, B)	8
2. Définition du but poursuivi	15

CHAPITRE I - MATERIELS ET METHODES.

1. Protocole expérimental de culture	17
1.1. Exposé succinct des méthodes classiques de culture sans sol	17
1.2. Solutions nutritives retenues (macro et micro-éléments)	18
1.3. Description du dispositif expérimental employé	21
1.4. Choix de la plante retenue	26
1.5. Essais pratiques effectués	27

2. Technique d'analyse	27
2.1. Eléments étudiés	28
2.2. Préparation des échantillons de plantes pour l'analyse	28
2.3. Spectrométrie d'absorption atomique avec flamme (dosage de Ca, Mg, K)	30
2.4. Spectrométrie d'absorption moléculaire (dosage de B, Fe, P)	33
2.5. Spectrométrie d'absorption atomique en four appliquée au dosage des éléments traces	34
2.5.1. Généralités et principe	34
2.5.2. Mise au point de nouvelles méthodes de micro- analyse sur des quantités très petites de végétaux	37
2.5.3. Adaptation des méthodes de dosage des oligo- éléments aux solutions nutritives	38
2.5.4. Problèmes particuliers liés à l'analyse des plantes et des solutions nutritives	39
2.5.5. Recherche du programme thermique de dosage de chaque élément	42
2.5.6. Contrôle des résultats	50

CHAPITRE II - RESULTATS.

1. Examen morphologique des plantes	53
2. Mesure de la croissance : hauteur des plantes à diffé- rents stades des essais	56
3. Poids de matière sèche produit en fin d'essai	78
3.1. En cas de déficience en oligo-éléments	78
3.2. En cas d'excès en oligo-éléments	80
4. Analyse des solutions nutritives au cours des essais .	82
4.1. Dosage des éléments majeurs	82
4.2. Dosage des oligo-éléments	88
4.3. Conclusion	102
5. Dosage des éléments majeurs dans les différentes par- ties des plantes : feuilles, gaines, racines, graines	104
6. Dosage des oligo-éléments dans les différentes par- ties des plantes : feuilles, gaines, racines, graines	111

6.1. Cas des oligo-éléments en concentrations suffisantes dans le milieu	112
6.2. Cas des oligo-éléments en excès dans le milieu (troisième essai)	120
6.3. Conclusion	132
7. Corrélation dans les solutions nutritives entre les taux en macro et micro-éléments	134

CHAPITRE III - DISCUSSION.

1. Influence des doses d'oligo-éléments sur l'aspect morphologique du blé	139
2. Influence des oligo-éléments sur la production de matière végétale	141
3. Evolution de l'absorption des éléments nutritifs	144
3.1. En fonction du temps	144
3.2. En fonction de la croissance des plantes	146
4. Répartition des oligo-éléments dans les différents organes de la plante	147
4.1. Présence de concentrations nécessaires et suffisantes en oligo-éléments dans le milieu	148
4.2. Présence d'oligo-éléments en excès dans le milieu ..	150
5. Corrélation entre les absorptions des oligo-éléments	153
6. Corrélation entre les absorptions des macro et des oligo-éléments	155
CONCLUSIONS GENERALES	157
BIBLIOGRAPHIE	160

INTRODUCTION.

Ce travail ne prétend pas exposer la méthodologie d'étude des oligo-éléments mais présente plutôt certaines observations sur leur comportement et leur assimilabilité.

Depuis un certain temps déjà, il est apparu, non seulement à la suite d'expériences de laboratoire conduites dans des conditions artificielles, mais également d'après le comportement des cultures en plein champ, que des éléments, autres que les éléments majeurs, étaient nécessaires à la vie des plantes.

On constate, aujourd'hui, que la science agronomique consacre des recherches de plus en plus nombreuses sur les éléments mineurs. Ceci résulte vraisemblablement du retard initialement pris dans ce domaine mais aussi parce que les moyens modernes permettent des investigations beaucoup plus approfondies, tant dans le domaine de l'analyse chimique des oligo-éléments que dans la fabrication de produits chimiques de très haute pureté.

En effet, plusieurs questions se posent concernant la présence des oligo-éléments dans les sols et les plantes, en particulier leur assimilabilité et leur fonction biologique.

A notre époque, l'information devient de plus en plus importante en ce qui concerne les oligo-éléments, autant dans l'agriculture que dans les domaines biologique ou écologique.

L'intérêt agronomique des oligo-éléments avait été mis en évidence par Gabriel BERTRAND (1905) dès ses premiers travaux sur leur rôle dans les végétaux. A l'origine, c'est la démarche d'un biochimiste qui a conduit aux applications agricoles importantes que l'on sait. La méthodologie du diagnostic des subcarences ainsi que des prétoxicités est pratiquement inexistante (TROCME, 1977) malgré les travaux de Gabriel BERTRAND suivis de ceux de JAVILLIER (en 1912) concernant, par exemple le rôle du zinc dans l'augmentation des rendements du maïs et de plusieurs autres auteurs : WALLACE (1961), DENNIS et O'BRIEN (1937), NICHOLAS (1961).

On pourrait citer divers exemples récents concernant chacun des oligo-éléments montrant leur action positive plus ou moins accentuée en l'ab-

sence de tout symptôme de carence : action du zinc sur le rendement et la qualité du maïs ou du lin (TROCME, 1970), action du cuivre sur la résistance des céréales à la verse en présence de doses élevées d'azote (VETTER et TEICHMAN, 1968), action du bore sur les apex : en effet, les régions méristématiques des pousses et des racines (comprenant les méristèmes apicaux et cambiaux) étant les principaux sites de la carence en bore, une manifestation de désordre apparaît dans l'aire de différenciation dans le cas de toxicité (MAYNARD, 1979).

Ainsi, les sujets de recherches sur les oligo-éléments ne manquent pas en raison des multiples interactions dues aux facteurs pédologiques, climatiques, génétiques et techniques, sur les processus d'intervention des oligo-éléments.

Ce thème central peut et doit être abordé soit par une approche globale des problèmes, soit par une approche plus spécifique au niveau de la plante et du milieu nutritif.

Il nous semble nécessaire de signaler qu'il est désormais admis que la caractérisation d'une déficience ou d'un excès en oligo-éléments, plus spécialement le cuivre, le fer, le manganèse, le zinc et le bore qui font l'objet de cette étude, à partir des seuls symptômes visuels relevés sur le végétal, est une opération peu précise, pouvant même être la source d'erreurs. A cet égard, MAYNARD, en 1979, insiste sur le fait que l'analyse des tissus végétaux est extrêmement utile pour confirmer les symptômes visuels, surtout dans le cas de désordres induits ; c'est ainsi que LORENZ et TYLER, en 1976, ont donné une liste étendue des teneurs en éléments nutritifs suffisantes ou déficitaires à des stades définis du développement des plantes de plusieurs productions végétales.

1. DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.

La bibliographie des oligo-éléments devenant de plus en plus abondante, surtout ces dernières années, au moins sur certains aspects des recherches, nous pensons utile d'en faire un résumé succinct en ce qui concerne l'objet de nos recherches.

1.1. Importance des oligo-éléments dans les sols et les plantes.

Les sols contiennent généralement les oligo-éléments indispensables mais parfois en quantités insuffisantes. Cependant, la pédogenèse peut conduire à des accumulations d'oligo-éléments, parfois des excès, en particulier dans les sols dérivés de roches sédimentaires argileuses (schistes, ardoises) ; en revanche, les sols formés à partir de sédiments sableux et de roches calcaires sont pauvres (MITCHELL, 1963). On peut aussi signaler l'influence glaciaire qui conduit à un mélange de roches-mères et de sédiments fracturés, broyés et lavés, pauvres en oligo-éléments. En dehors des formations alluviales, la dégradation de la roche-mère, sous l'influence des conditions climatiques et de la végétation, donne naissance in situ à des sols à la fois riches en matières organiques et en matières minérales (COIC et TENILLE, 1971). Nous constatons ainsi que, non seulement la roche-mère influe sur la teneur en oligo-éléments des sols et par conséquent des végétaux, mais aussi sur les processus de pédogenèse. Ces mêmes auteurs estiment qu'il n'y a pas obligatoirement un parallélisme entre la richesse de la roche-mère et des sols en oligo-éléments.

Les oligo-éléments dans les sols se trouvent sous plusieurs formes : ions libres dans la solution du sol, complexes organo-minéraux solubles, ions adsorbés sur la phase colloïdale, ions précipités ou liés à la phase solide. La distribution d'un élément entre ces différentes formes est régie par l'équilibre de différentes réactions telles que précipitation et dissolution, complexation et décomplexation, adsorption et désorption (KIEKENS, 1975).

Toutes ces formes sous lesquelles les oligo-éléments existent ne sont pas accessibles à la racine de la plante ; il existe une fraction dite "assimilable" qui ne représente souvent qu'une très faible partie de quantité totale de l'oligo-élément présent et qui, seule, intéresse l'alimentation des plantes.

L'assimilabilité d'un élément dépend de sa forme, de sa valence, de sa disponibilité, du pH, de la matière organique, de la texture du sol et de la capacité d'échange cationique (C.E.C.) ; il n'y a donc pas de corrélation étroite entre la quantité totale d'oligo-éléments et la fraction

assimilable ; cette corrélation est plus ou moins grande suivant l'oligo-élément. Elle est assez forte pour le cuivre, souvent très faible pour le manganèse (COPPENET, 1959) ; pour le fer, une quantité de 1 à 10 ppm seulement est assimilable par les plantes (DUCHAUFOUR, 1977). Il est important de pouvoir distinguer la quantité totale de la quantité assimilable et mobile.

Ce sont essentiellement les colloïdes argilo-humiques qui sont responsables de la disponibilité des oligo-éléments ; en effet, c'est à leur surface qu'est retenue, à l'état d'ions, la plus grande quantité de ces éléments.

A côté des éléments majeurs, plusieurs éléments mineurs (Cu, Fe, Mn, Zn, B, Mo) sont indispensables à la vie des plantes. Les tissus végétaux n'en renferment que des quantités minimales, quelques parties par million (10^{-6}) à quelques parties pour mille (10^{-3}) (BONNEAU et SOUCHIER, 1979). Mais, ils doivent être présents en concentrations suffisantes pour assurer un développement optimal. Aussi a-t-on cherché à établir un système de diagnostic basé sur l'examen visuel et l'analyse foliaire des plantes et sur des tests généraux pour les plantes. GOODALL et GREGORY, en 1947, furent les premiers à avoir recours à ce système et lui donnèrent une grande extension. Ce travail a été poursuivi par CHAPMAN en 1966 aboutissant à l'élaboration de tableaux très fournis sur le contenu des tissus des plantes en oligo-éléments (voir publication de BERGMANN et NEUBER en 1976 cité par COTTENIE en 1979).

Le métabolisme minéral dans les plantes est largement étudié mais nous ne connaissons, en réalité, que peu de choses sur le mécanisme de ce métabolisme (HELLER, 1977 ; CAMERLYNCK, 1979).

Notre connaissance sur le rôle des oligo-éléments dans les plantes indique qu'ils agissent comme co-facteurs ou activants dans le système enzymatique (VIALLE et al., 1970). On peut distinguer deux groupes d'enzymes - les enzymes contenant un métal spécifique et faisant partie intégrante de la formule,
- et les enzymes renfermant un ou plusieurs métaux jouant le rôle d'activant.

Mais ces deux groupes sont quelque fois difficiles à séparer. Le rôle du zinc, du cuivre, du fer et du molybdène a été clairement montré ; ces métaux sont à la fois spécifiques et partie intégrante d'un certain nombre de systèmes enzymatiques (PRICE et al., 1972).

1.2. Importance des oligo-éléments dans la fertilité des sols.

L'influence des éléments traces est grande sur la fertilité des sols. Leur absorption par les plantes, en trop faible ou trop forte quantité, peut provoquer des maladies de carence ou de toxicité dans les cultures. Le sol a été, à cet égard, considéré de tout temps comme un support nutritif ; depuis le début du siècle, l'un des objectifs principaux des agronomes, chimistes du sol, pédologues et géochimistes, a été de définir et de doser, dans divers sols, les réserves d'éléments assimilables susceptibles d'alimenter les cultures (WALLACE, 1947; SWAINE et al., 1960 ; VINOGRADOV, 1959 ; PINTA, 1961 ; TROCME, 1977 ; COTTENIE et al., 1979 ; POELSTRA et al., 1979).

En relation avec la nutrition des plantes, la fraction facilement solubilisée des oligo-éléments est caractérisée par ce que l'on appelle "l'intensité nutritive" (COTTENIE, 1979) ; c'est la quantité totale mobilisable qui représente la capacité nutritive d'un sol. Mais, du point de vue analytique, s'il est difficile de déterminer cette capacité nutritive, il est tout de même possible, en cas de carence, de remédier à l'insuffisance des éléments fertilisants du sol par des engrais appropriés. L'addition d'oligo-éléments au sol peut montrer un effet, tant du point de vue quantitatif que qualitatif (COTTENIE, 1979).

L'effet quantitatif, sur le développement des végétaux, est exprimé par un index de tolérance (Ti) défini comme suit :

$$Ti = \frac{\text{croissance en milieu enrichi}}{\text{croissance en milieu normal}}$$

Quand Ti est significativement inférieur à 1, l'élément étudié peut parfois provoquer des effets phytotoxiques. Ainsi, COTTENIE a noté que des quantités relativement faibles de bore, de cuivre ou autres, sont phytotoxiques tandis que de grosses quantités d'un élément comme le plomb peuvent exister sans provoquer d'effet phototoxique. L'aspect qualitatif consiste à changer la concentration de l'élément trace dans les tissus de la plante.

La carence et la toxicité des oligo-éléments se traduisent toujours par un retard de croissance, retard ou absence de floraison, absence ou extrême rareté de graines (GENEVOIS, 1971). Mais les expériences de HOAGLAND et son école ont montré que la carence réellement complète est mortelle pour l'espèce végétale et annihile le développement de la plante. D'autre part, l'activité physiologique considérable des oligo-éléments fait que s'ils sont nécessaires, leur excès devient rapidement néfaste. De ce fait, contrairement aux éléments majeurs, la gamme optimale de concentration est assez étroite ; l'on conçoit donc que le maintien de la fertilité du sol, au point de vue oligo-éléments, est assez difficile, et que l'on doit agir prudemment pour éviter les effets de toxicité (ou de carence) qui peuvent aller jusqu'à réduire complètement la récolte, même si les autres facteurs pédologiques sont convenables.

1.3. Evolution des études des oligo-éléments en culture hydroponique.

L'étude des oligo-éléments en aquiculture (HELLER, 1977) a contribué, tout au long de ce siècle, à développer nos connaissances aussi bien en ce qui concerne les différents aspects de leur influence sur les plantes, que de l'antagonisme ou l'action synergique existant entre oligo-éléments et entre ces éléments et les macro-éléments, et, par suite, leur assimilabilité par les plantes.

Cette étude a également abouti à la détermination relative des concentrations adéquates des oligo-éléments dans les solutions nutritives garantissant un bon développement des plantes.

Les premiers travaux avaient pour but de mettre en évidence la présence des oligo-éléments dans les végétaux où ils sont indispensables et de définir des solutions nutritives relativement standard.

KNOP (1861, 1865), en faisant varier la composition des solutions nutritives dans ses expériences et en introduisant les éléments traces nécessaires aux plantes, a pu améliorer la composition des solutions nutritives convenant aux cultures hydroponiques. En 1865, il a proposé une composition de la solution nutritive connue sous son nom et utilisée aujourd'hui encore.

VON SACHS (1860), préférant la culture sur solution nutritive à la culture sur sable comme moyen d'étude de la nutrition minérale des plantes, a été le premier à utiliser une solution nutritive étalon relativement simple qui contenait tous les éléments considérés, à cette époque, comme indispensables au bon développement des plantes.

Le fer fut le premier oligo-élément connu comme élément nécessaire aux plantes. VAN DER CRONE (1904, cité par HEWITT (1963)) a découvert la chlorose ferrique sur culture en solution nutritive et dès lors, cette chlorose a pu être corrigée en ajoutant du phosphate ferreux.

Le manganèse, à la suite de travaux sur l'avoine (*Avina sativa*) de SALMHORSTUMER, en 1851, fut le second oligo-élément à être considéré comme essentiel pour les plantes.

L'importance du zinc a été signalée par RAULIN (1869) pour l'*Aspergillus niger*, ainsi que par G.BERTRAND et JAVILLIER, 1911 ; plus tard, MAZE (1914) indique qu'il est indispensable aux plantes supérieures (maïs).

En ce qui concerne le bore, AGHULON, dès 1910 (cité par MILLER, 1938), découvre sa présence et son importance pour le blé (*Triticum*), l'avoine et le radis (*Raphanus sativus*).

Sur la tomate (*Lycopersicon esculentum*) et le tournesol (*Helianthus annuus*) cultivés sur solutions nutritives, SOMMER (1931), LIPMAN et MACKINNEY (1931), ont montré que le cuivre était indispensable à ces plantes. PIPER, en 1942, confirme l'importance de cet élément pour plusieurs autres espèces végétales.

ARNON et STOUT (1939a) et ARNON (1948) ont poussé l'étude vers un stade plus approfondi en cherchant la spécificité de chaque oligo-élément et leur rôle direct durant toute la vie de la plante.

En cultivant des plants de tomates sur solution nutritive contenant des quantités minimales d'oligo-éléments, GERLOFF et al. (1959) ont signalé l'antagonisme molybdène-fer.

HEWITT, en 1954, en étudiant l'interaction entre les éléments minéraux y compris les micro-éléments, a montré la possibilité de plusieurs métaux d'induire la déficience en fer.

D'autre part, HAGEMAN et al. (1961) ont montré que le lin (*Linum usitatissimum*) ne peut pas, malgré son grand besoin en fer, utiliser certains

composés présents dans la solution nutritive, mettant ainsi en évidence qu'un élément n'est pas assimilable sous n'importe quelle forme.

En vue d'étudier la concentration optimale des micro-éléments, plusieurs auteurs ont ajouté de petites quantités de micro-éléments aux plantes cultivées sur solution nutritive pour pallier à la carence et tester la stimulation éventuelle que peuvent provoquer ces oligo-éléments chez les plantes.

C'est ainsi que VLAMIS et WILLIAMS (1962) ont trouvé que la concentration en manganèse, telle qu'elle existe dans la solution nutritive de HOAGLAND (0,25-0,50 ppm), est toxique pour l'orge (*Hordium vulgare*), cultivée dans les conditions climatiques de l'été.

HALLSWORTH et al. (1964) ont indiqué que le besoin en cuivre dépendait du stade de développement des plantes.

En outre, de nombreux travaux concernant l'enrichissement en oligo-éléments des différentes parties des plantes, ont été faits ; COÏC et al. (1974) ont bien montré la difficulté d'enrichir en cuivre les tissus de plusieurs espèces fourragères (graminées et légumineuses) en augmentant la concentration de cet élément dans la solution nutritive.

Tout récemment, BROWN (1979), en étudiant plus précisément les rapports entre le bore et le cuivre dans la plante, a montré que l'absence simultanée du bore et du cuivre affectait la floraison plus que ~~maximiserait~~ la carence en un seul élément et qu'une déficience modérée en bore aidait à maintenir les plantes carencées en cuivre.

La question des concentrations optimales est toujours à discuter car elles sont régies par plusieurs facteurs : l'âge, l'espèce et la densité de la plante, le type de culture, le renouvellement de la solution nutritive, l'intensité lumineuse, la saison, les concentrations des autres éléments (HEWITT, 1963) ; ainsi, les formules d'oligo-éléments relèvent-elles d'une certaine souplesse (HELLER, 1977).

1.4. Etat actuel des travaux sur les oligo-éléments étudiés.

1.4.1. Le fer.

La présence de fer chez les végétaux est découverte dès le XVIIIème siècle

Depuis lors, il a pris une grande importance aussi bien en pédologie qu'en physiologie végétale.

C'est en 1904 que VAN DER CRONE (cité par HEWITT, 1963) découvrit que la chlorose était une maladie physiologique causée par une déficience en fer ; depuis, cette maladie est corrigée à l'aide d'un apport phosphate ferreux.

La difficulté de maintenir le fer en solution a attiré l'attention des chercheurs depuis assez longtemps. Ils ont essayé de trouver des composés chimiques "chelant" le fer (complexes organo-métalliques qui empêchent la précipitation du fer et qui le libèrent progressivement sous forme d'ion assimilable) ; sans ces composés nous nous trouverions dans l'obligation d'ajouter fréquemment du fer aux solutions pour assurer une alimentation convenable de cet élément. En 1945, GREGORY et al., en étudiant la réaction du lin vis à vis de l'alimentation en fer, ont remplacé le phosphate ferrique par le chlorure ferrique mieux solubilisé et absorbé.

En définitif, le traitement de la chlorose ferrique n'a pas encore reçu de solutions vraiment satisfaisantes, malgré l'emploi de composés organiques "chélateurs" du fer comme Fe-EDTA, Fe-EDDHA, Fe-DTPA, qui sont les meilleures sources du fer dans les solutions nutritives.

On s'est orienté, tout dernièrement, (DELAS, 1977) vers la sélection de porte-greffe résistant au calcaire qui rend difficile l'absorption du fer, selon des mécanismes encore mal connus ; cette sélection est facilitée par la détermination préalable au laboratoire de la capacité de saturation en calcium des racines (une capacité de saturation élevée correspond à une sensibilité marquée à la chlorose).

Par ailleurs, NAMBIAR et al. (1971), en cherchant l'influence de l'humidité sur l'absorption du fer, ont montré que cette influence variait beaucoup suivant les espèces végétales ; la concentration du fer augmente dans le haricot (*Phaseolus vulgaris*) quand on augmente l'humidité tandis qu'elle baisse chez le citronnier et l'avocatier.

On sait maintenant que le fer a un rôle exclusivement oligo-dynamique ; on le trouve au sein de catalyseurs biochimiques assurant les oxydoréductions, ainsi il catalyse la décarboxylation de certains acides cétoniques (HELLER, 1977).

1.4.2. Le cuivre.

Le cuivre est un élément connu depuis 150 ans comme constituant des graines ; sa présence pose, à l'agriculture, des problèmes allant de la carence à la toxicité. Plus récemment, son rôle biologique important a été reconnu par plusieurs auteurs (HART et al., 1928, cité par SILLANPAA, 1972 ; LIPMAN et al., 1931).

D'autre part, le cuivre a été établi comme un élément essentiel pour le développement et la croissance des plantes mais aussi comme un constituant de divers enzymes d'oxydation : lacase, acide ascorbique oxidase, tyrosinase. Comme le fer, il peut activer la nitrate-réductase et catalyser certaines décarboxylations (HELLER, 1977).

Le cuivre existe dans toutes les roches en quantités différentes : 100-200 ppm en moyenne dans les roches éruptives basiques, 10-20 ppm dans les roches éruptives acides, 30-40 ppm dans les roches métamorphiques et certaines roches sédimentaires (AUBERT et PINTA, 1977). La fixation du cuivre, par la matière organique, est la raison principale de la déficience en cet élément (SZALAY et SZILAGYI, 1968).

L'interaction entre le cuivre et les autres oligo-éléments a été reconnue par plusieurs auteurs. REUTHER et SMITH, en 1953, ont relevé que l'excès de cuivre induit la déficience en fer dans le citronnier.

En outre, de nombreux chercheurs ont montré que l'influence du cuivre affecte la production végétale plus que le stade végétatif (BROWN et al., 1972 ; GRAVES et al., 1974 ; GRAHAM, 1976). D'autre part, la différence considérable entre les espèces végétales, en ce qui concerne leur sensibilité à la déficience en cuivre, a été bien montrée. WOODHOUSE (1964) a indiqué que l'avoine et le blé sont apparemment de bons indicateurs pour détecter la déficience en cuivre, tandis que le tabac (*Nicotiana tabacum*) dans les mêmes conditions, ne montre aucun symptôme (MacMURTREY, 1964).

1.4.3. Le zinc.

RAULIN, en 1869, a montré le rôle stimulant du zinc dans la croissance de l'*Aspergillus niger* ; sa nécessité pour les plantes supérieures a été indiquée par MAZE en 1914 et JAVILLIER fut le premier, en 1912, à recom-

mander les sels du zinc comme engrais au champ.

L'absence de zinc provoque des troubles en détruisant l'auxine (facteur de croissance), ce qui expliquerait l'insuffisance de l'allongement des entre-noeuds observé chez des plantes carencées. Il fait partie de l'anhydride carbonique ; il entre aussi dans la composition de divers systèmes enzymatiques régularisant les processus d'oxydo-réduction.

D'autre part, la carence partielle se traduit par une réduction considérable du rendement en graines ; des taches de chlorose apparaissent sur les feuilles des extrémités. Cette carence est assez fréquente chez les arbres fruitiers où elle provoque la maladie grave de la "rosette" qui consiste en raccourcissement des entre-noeuds des rameaux jeunes, en feuilles anormalement petites d'où le nom. Ces carences sont souvent constatées sur des sols alcalins ainsi que dans les zones froides et humides (SILLANPAA, 1972) ; elles sont corrigées par des apports de composés du zinc solubles.

Au cours de la dernière décade, la bibliographie accumule de plus en plus de preuves en faveur de l'hypothèse selon laquelle des déséquilibres de nutrition, appelés par certains auteurs "carence en zinc", sont de nature physiologique et engendrés par le dérèglement des fonctions spécifiques de cet élément (OLSEN, 1972 ; LINDSAY, 1973).

Tout récemment, SHROTRI et al. (1979) ont bien montré que la déficience du 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.

La présence de zinc dans les sols se trouve en concentrations relativement fortes (50-100 ppm) (AUBERT et PINTA, 1977) ; il est, d'une façon générale, plus disponible dans les sols acides que dans les sols alcalins, le pH correspondant à la plus faible disponibilité du zinc se situant entre 6,0 et 7,0. Il a été montré depuis longtemps que le chaulage d'un sol réduit la disponibilité de cet élément. On a constaté aussi que certaines plantes se montrent plus aptes à absorber le zinc du sol que d'autres.

Récemment, KUO et al. (1979) ont indiqué que la déficience en zinc est le problème le plus fréquemment rencontré pour les oligo-éléments nutritifs dans les sols calcaires et alcalins et que ce problème résultait

peut-être de la disponibilité très basse du zinc dans ces sols ainsi que d'un antagonisme possible avec un autre élément qui interférerait dans l'absorption du zinc par la plante et pourrait empêcher son transport de la racine vers les parties aériennes. On peut citer, ici, l'antagonisme phosphore-zinc (cité par SAEED et FOX, 1978).

1.4.4. Le manganèse.

La présence du manganèse dans les végétaux a été signalée depuis la fin du XVIIIème siècle. G.BERTRAND, en 1905, fut le premier à montrer que c'est un élément essentiel au bon développement de la plante, ce qui devait être confirmé plus tard.

L'effet toxique du manganèse a été montré sur les céréales par ASO, en 1902, ainsi que sur plusieurs autres espèces végétales par d'autres auteurs. Ainsi MILLIKAN, en 1947, a décrit la nécrose typique du lin causée par un excès de manganèse.

Par contre, la carence naturelle en manganèse a été montrée relativement tard. Elle est assez fréquente et se rencontre dans tous les végétaux cultivés. Cette carence se manifeste surtout sur les sols tourbeux mais les symptômes ne sont pas les mêmes (les céréales présentent des taches grises allongées "grey speck", les légumineuses souffrent de chlorose et de la "tache des marais" "marsh spot"). Des détails sur la description des carences en manganèse sont donnés par SPRAGUE (1964), dans son livre "Hunger signs in crops". Certains, comme WHITH et al. (1970), ont indiqué que les symptômes de carence et de toxicité peuvent être les mêmes sur la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), par exemple : une particularité de la toxicité en manganèse est l'élévation considérable de la teneur en manganèse dans les parties aériennes (DELAS, 1977). La sensibilité des plantes varie selon les espèces : ainsi, l'arachide est plus sensible que le maïs (BENAC, 1976).

Le manganèse a plusieurs fonctions dans la plante. C'est, d'une part, un élément essentiel dans la photosynthèse (présence du manganèse dans la molécule de chlorophylle), d'autre part, sa spécificité a été reconnue comme catalyseur dans plusieurs réactions enzymatiques (LOHNIS, 1951). Ainsi, maintenant, on sait que le manganèse joue un rôle important,

non seulement dans plusieurs réactions de décomposition des hydrates de carbone et dans les métabolisme des acides organiques, mais aussi dans un certain nombre de réactions impliquées dans le métabolisme de l'azote et du phosphore.

Le manganèse se trouve dans tous les sols en quantité très supérieure, en général, à celle des autres oligo-éléments (100 à quelques 1000 ppm). La quantité totale ne peut pas être considérée comme une indication importante pour l'assimilabilité de cet élément par la plante car plusieurs facteurs peuvent l'influencer (HOYT et NYBORG, 1971).

D'autre part, le manganèse se trouve dans les sols principalement sous deux formes :

- manganèse divalent (Mn^{++})
- et manganèse tétravalent (Mn^{4+}).

RUSSEL, en 1961, constate que les plantes peuvent absorber le manganèse divalent mais pas tétravalent.

Tout récemment, MAYNARD (1979) a indiqué que dans des sols très acides les symptômes de toxicité en manganèse peuvent être masqués ou liés à une toxicité en fer ou en aluminium. En outre, des antagonismes entre fer et manganèse ont été signalés par plusieurs auteurs mais cette question reste encore à discuter; ainsi, le mécanisme de migration et d'action du manganèse n'est pas encore suffisamment étudié.

1.4.5. Le bore.

Nous savons depuis le début du siècle que le bore existe dans tous les végétaux et que sa concentration varie considérablement d'une espèce à l'autre. G.BERTRAND (1903) (cité par SILLANPAA, 1972) fut le premier à signaler que le bore est un élément utile aux plantes.

MAZE, en 1914, a montré que le maïs, cultivé sur solution nutritive, a besoin du bore pour le déroulement de son cycle végétatif. Plus tard, le rôle essentiel du bore comme élément nutritif a été confirmé par plusieurs chercheurs (WARINGTON, 1923 ; SOMMER , 1931).

En cherchant à mieux connaître les effets du bore sur les plantes, BRANDENBURG, en 1931, a décrit une maladie du coeur de la betterave et, dès lors, des carences ont été observées sur un très grand nombre d'espèces

végétales (rupture de nervures à la partie inférieure des périoles du céleri, apparition de zones brunes et liégeuses dans l'inflorescence du chou-fleur, coulure des fleurs et formation de liège interne dans les fruits à pépins, ...).

Le bore est associé à l'activité méristématique, à celle de l'auxine, à la formation de la pectine des membranes cellulaires, au métabolisme des protéines, au mécanisme d'intervention de l'eau à l'intérieur de la plante, au processus de maturation et d'inhibition de phénolase.

Comme pour le manganèse, la carence en bore diminue la résistance à certaines infections telle que la maladie du cœur de la betterave, nécrose provoquée par un champignon, le *Phomabetae*, qui envahit le collet lorsque la plante est carencée.

Ainsi, ces études ont montré que le bore était essentiellement nécessaire au maintien de la croissance apicale et est directement associé à la division cellulaire. De ce fait, le bore est considéré, par certains auteurs, comme l'oligo-élément le plus important en agriculture (SILLANPAA, 1972).

La différence de besoin en bore des plantes est, pour certains chercheurs, attribuée à la production de méristème secondaire dans certaines plantes (HEWITT, 1961 ; SAUCHELLI, 1969).

Les études concernant le bore dans les sols ont montré que l'écorce terrestre renferme, en moyenne, 10 ppm de bore ; son existence comme bore total varie beaucoup d'un sol à l'autre. De même, les concentrations en bore utilisable par les plantes varient en fonction de l'humus, de la matière organique totale, de la texture et du pH des sols.

La carence en bore se manifeste sur plusieurs types de sol (sols argilo-calcaires, sols très acides) ; il en est de même de la toxicité, même si elle se manifeste à un moindre degré sur des plantes sensibles cultivées dans des régions extrêmement sèches (MAYNARD, 1979). Le progrès des connaissances en physiologie végétale accumulées au cours de deux dernières décennies, apporte une contribution efficace au délicat problème de la chronologie de l'application des traitements boratés.

Il est, en effet, souhaitable d'établir une concordance satisfaisante entre les exigences maximales en cet élément évaluées au cours des diffé-

rents stades phénologiques et l'application de bore au sol. Mais il ne faut pas ignorer que l'élimination de la carence ne sera définitivement assurée que si l'on apporte également d'autres éléments, ceux dont les interférences avec le bore ont été reconnues, par exemple l'azote et le potassium dans le cas du cerisier (HUGUET, 1977).

Malgré les nombreux et importants travaux sur la nutrition des plantes en bore pendant ces 70 dernières années, l'action spécifique du bore dans la plante et son assimilabilité restent encore assez mal connues.

2. DEFINITION DU BUT POURSUIVI.

Une analyse plus approfondie des études, assez diversifiées, faites jusqu'à présent sur les oligo-éléments, montre qu'il est important d'étudier les différents facteurs (pédologique, physiologique, nutritif, ...) afin de parvenir à une meilleure compréhension des problèmes posés sur les oligo-éléments et de pouvoir les résoudre.

Ces études difficiles et de longue haleine doivent donc être abordées sous différents aspects.

En effet, le but final et primordial des chercheurs travaillant sur la production végétale est de satisfaire les besoins des cultures en macro et oligo-éléments afin d'obtenir la production optimale et de meilleure qualité possible. Ce but ne peut être atteint qu'après des recherches qui sont à l'origine de toute application au champ, ce qui est d'ailleurs le cas de notre travail.

Nous étudions quelles sont les quantités d'oligo-éléments absorbées par le blé cultivé dans différents milieux nutritifs et nous essayons de suivre leur assimilabilité par les différentes parties de la plante ainsi que leur effet sur la production de matière végétale. Par ailleurs, à partir de l'analyse de solution nutritive de concentrations initiales connues, nous nous proposons d'étudier à quelle période de sa croissance le blé absorbe le plus d'oligo-éléments, phénomène qui, jusqu'à présent, n'a pas fait l'objet d'études particulières en culture hydroponique.

Enfin, sachant l'importance des relations existantes entre macro et micro élément, relations connues depuis plus d'un siècle, nous avons tenté de les étudier aussi.

Chapitre I.

MATERIELS ET METHODES.

1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE CULTURE.

1.1. Exposé succinct des méthodes classiques de culture sans sol.

Les méthodes utilisées dans ce type d'étude sont multiples et connues depuis un certain temps. Ces méthodes de culture sur sable ou sur solutions nutritives ont été, depuis plus d'un siècle, mises au point dans le but scientifique de faire progresser la connaissance de la physiologie des plantes, la détermination de leurs besoins en éléments nutritifs, ainsi que le rôle des ions dans les plantes. Elles ont d'ailleurs reçu, depuis une vingtaine d'années, des applications industrielles.

Par ailleurs, la découverte des oligo-éléments leur a donné plus d'importance et elles se sont beaucoup développées ces dernières années : mise au point de nouvelles méthodes de culture stérilisées, perfectionnement de la purification des composés chimiques et de l'eau, et contrôle de la contamination.

Les matériels de base utilisés sont, en général, des pots, des béciers ou autres récipients en pyrex, des récipients en polyéthylène, des petits vases de végétation mis au point par CHAMINADE (1964). Récemment, nous avons beaucoup utilisé des matériels en plastique inerte.

Peu de travaux se rapportant à l'importance de la forme des récipients sont publiés.

L'emploi de couvertures a plusieurs buts : elles diminuent la perte d'eau, protègent de la poussière et servent de support aux plantes.

La culture sur sable assure un milieu solide aux racines et, à cet égard, elle leur fournit des conditions plus proches de celles des sols. En outre, les plantes sont tenues naturellement par leur système racinaire qui se développe dans l'obscurité, dans le cas surtout où il faut transplanter les plantes au cours de leur croissance (arbres par exemple) il est plus facile de les cultiver sur sable. WEBB, en 1954, a beaucoup développé l'application de cette technique.

Mais, en revanche, un contrôle strict du pH est plus difficile dans la culture sur sable par suite de la diminution de la diffusion et de la réduction importante du volume du fluide entourant immédiatement les racines ; ces mêmes limitations se retrouvent pour le contrôle de concentrations minimales des éléments nutritifs ; il en résulte que la culture sur sable convient moins que l'agriculture sensu stricto pour des travaux précis se rapportant aux problèmes de pH et aux concentrations des éléments. La culture sur solutions nutritives présente aussi un autre avantage important : absence de contamination due à la présence des oligo-éléments dans le sable. Ainsi, la culture sur solution nutritive permet mieux le changement de ces solutions : il suffit de remplacer les anciennes solutions ou de transporter les plantes dans d'autres récipients.

Le seuil des concentrations toxiques des ions métalliques, comme le cuivre et le zinc, dans la culture sur sable, est dix fois plus élevé que celui obtenu en culture sur solutions nutritives (FORISON, 1958). La différence entre plantes cultivées sur solutions nutritives et sur sable est considérable en ce qui concerne le pH, l'assimilabilité et la distribution des éléments nutritives dans la plante.

1.2. Solutions nutritives retenues (macro et micro-éléments).

Nous avons utilisé les sels minéraux les plus purs existant : suprapur (Merck). Pour préparer nos solutions nutritives, les quantités employées sont indiquées dans le tableau 1.

TABLEAU 1 - Composition de solution nutritive illustrant les quantités de composés utilisés, inspirée de la formule de HOAGLAND et HOAGLAND et ARNON (in HEWITT, 1952).

Composition de la solution nutritive en macro-éléments	
Sels	Quantité dans la solution nutritive
KNO_3	0,200 g/l
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,492
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	0,230
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,490

Composition de la solution nutritive en micro-éléments	
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,22 mg/l
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,08
H_3BO_3	2,86
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	0,09
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,81
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (x)	7,56
EDTA Na_2 (x)	10,11

(x) Dans toutes les solutions nutritives $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ et EDTA Na_2 sont présents ; l'EDTA est utilisé comme "chélateur" du fer.

1.2.1. Concentrations des oligo-éléments.

Les concentrations des oligo-éléments, dans nos solutions nutritives, sont indiquées dans le tableau 2.

TABLEAU 2 - Concentration en $\mu\text{g/ml}$ des oligo-éléments contenus dans les solutions nutritives.

Eléments	Concentration
Zn	0,050
Cu	0,0203
B	0,499
Fe	1,520
Mn	0,497
Mo	0,0742

1.2.2. Concentrations des macro-éléments.

Les concentrations en éléments majeurs ont été calculées ; elles sont réunies dans le tableau 3.

TABLEAU 3 - Concentration en mg/ml des éléments majeurs dans les solutions nutritives.

Eléments	Concentration
K^+	0,077
PO_4^{3-}	0,190
SO_4^{--}	0,191
Mg^{++}	0,048
NH_4^+	0,046
Ca^{++}	0,083
NO_3^-	0,381

1.2.3. pH de la solution nutritive.

Le pH optimal de la solution nutritive dépend du type des végétaux ; il doit être acide pour qu'il n'y ait pas de précipitation de phosphate calcique. Le pH habituellement utilisé se situe entre 4,5 - 6,3. Le pH de nos solutions est de l'ordre de /5,1/ pour la solution de macro-éléments et /5,0/ pour la solution de macro-éléments + oligo-éléments (S.N.C.).

1.3. Description du dispositif expérimental employé.

Afin d'obtenir des résultats très sûrs, nous avons adapté le montage expérimental convenable aux conditions strictes qu'impose notre sujet.

1.3.1. Adaptation des méthodes classiques.

Cette adaptation consiste, en fait, à mettre au point le procédé nouveau suivant : nous avons employé des plateaux à trous (voir photos) servant comme support pour les tubes de culture (tubes Caubert, voir 1.3.1) ces tubes sont percés de deux trous. Dans le premier trou passe le tube d'aération de la solution nutritive et des racines des plantes ; dans l'autre trou est disposé un petit tuyau de diamètre de 0,6 cm et qui a pour but de supporter les plantes contenues dans chaque tube de culture. L'aération du milieu nutritif est assurée, comme le montre la photo 1, dans tous les tubes de culture, par injection lente d'air comprimé dans les solutions de manière à aérer le milieu d'une façon continue jour et nuit.

L'aération est contrôlée par le débit des bulles d'air, en fonction des besoins du blé dans ces conditions de culture ; il a été déterminé par un essai préliminaire. Le meilleur développement a été obtenu pour 135 à 140 bulles/minute pendant la première semaine et 145 à 155 bulles/minute pendant le reste du temps.

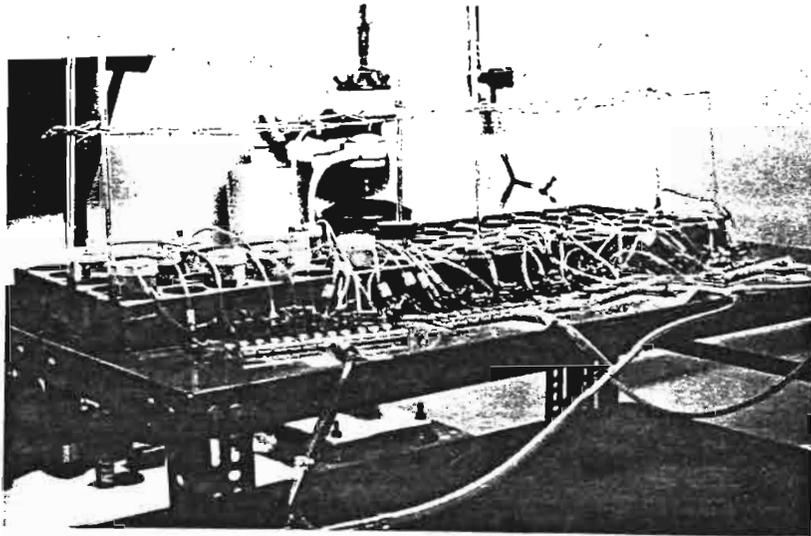


PHOTO 1 - Vue générale du dispositif expérimental.

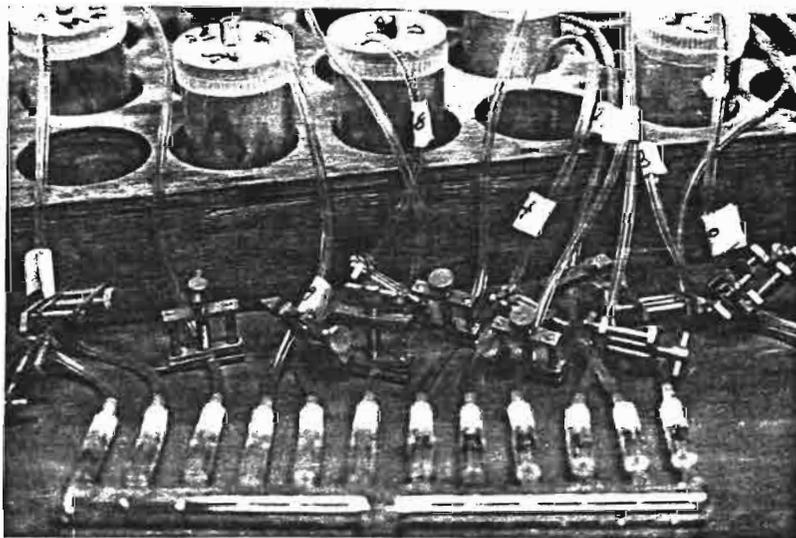


PHOTO 2 - Vue détaillée des répartiteurs d'air dans les solutions nutritives.

Ce débit est assuré par un ensemble de réglage. L'ensemble du montage a été disposé de façon à ce que les plantes reçoivent verticalement la lumière émise par des tubes fluorescents de 1,20 m de long (lumière blanche).

1.3.2. Matériels.

- Les tubes de culture : les tubes que nous avons utilisés pour nos essais sont des tubes Caubert standard, avec bouchons (réf. 337, Ø 33 mm, hauteur 70 mm, capacité 59 ml), dans lesquels nous avons percé deux trous : l'un pour le tube qui amène l'air dans la solution nutritive, l'autre pour la sortie des plantes.
- Les tubes amenant l'air dans les solutions nutritives : nous nous sommes servi de tubes de 0,3 mm de diamètre.
- Pince de réglage de l'aération : nous avons employé des "pinces de Mohr".

1.3.3. Distribution des traitements.

Nos deux premiers essais sont répartis en quatre traitements répétés neuf fois. Ces traitements sont les suivants.

- Premier traitement : à partir d'une solution nutritive complète (S.N.C.) (contenant les macro et les micro-éléments nécessaires à la vie de la plante) ; cette solution est inchangée pendant toute la durée de l'essai.
- Deuxième traitement : à partir d'une solution nutritive complète (S.N.C.) mais qui est renouvelée chaque semaine.
- Troisième traitement : à partir d'une solution nutritive de macro-éléments (S.N.M.), exempte d'oligo-éléments, non renouvelée durant toute la durée de l'essai.
- Quatrième traitement : à partir d'une solution nutritive exempte d'oligo-éléments (S.N.M.), renouvelée chaque semaine.

Les répétitions sont disposées au hasard.

Le troisième essai comprend six traitements différents de ceux des deux premiers essais ; chaque traitement est répété huit fois. Le nombre total de répétitions est de quarante huit, disposées au hasard. Les traitements sont les suivants.

- 1°) Solution nutritive complète seulement (solution témoin).
- 2°) Solution nutritive complète mais contenant une teneur en zinc cinq fois plus élevée que la solution témoin.
- 3°) Solution nutritive complète contenant une teneur en manganèse cinq fois plus forte que la solution témoin.
- 4°) Solution nutritive complète contenant une teneur en bore cinq fois plus forte que la solution témoin.
- 5°) Solution nutritive complète contenant une teneur en fer cinq fois plus forte que la solution témoin.
- 6°) Solution nutritive complète contenant une teneur en cuivre cinq fois plus élevée que la solution témoin.

1.3.4. Conditions ambiantes.

- Température : la température dans la salle de culture était de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Luminosité : les plantes sont éclairées 14 heures consécutives sur 24 heures ; l'éclairage est réglé grâce à une horloge automatique. L'intensité lumineuse est de l'ordre de 5500 Lux.
- Salle de culture : en tenant compte de la nécessité de travailler dans des conditions de pureté chimique et de propreté strictes, nous avons installé nos essais dans une salle consacrée uniquement à ce type d'étude ; cette pièce est à l'abri de toutes les contaminations dues au personnel, à l'appareillage ou au matériels. Ainsi, la pièce est conçue avec le minimum d'ameublement, les murs soigneusement recouverts de peinture glycérophtalique présentant une surface parfaitement lisse pour que la poussière n'accroche pas. Cette pièce a été aussi nettoyée et lavée au préalable.

1.3.5. Contamination.

La contamination se manifeste par une erreur dans le résultat final. Cette contamination peut survenir tout au long de l'essai et même pendant toutes les étapes du dosage ; les sources de contaminations sont multiples. Le schéma de ZIEF et MITCHELL (1976) résume les différents facteurs que nous devons essayer de contrôler pour les diminuer autant que possible

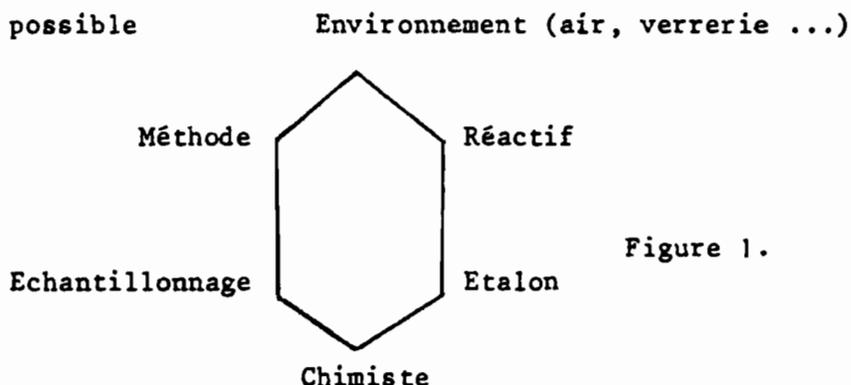


Figure 1.

Pour éviter le plus possible toutes ces contaminations, nous avons pris les précautions suivantes :

- environnement : pureté chimique de la pièce de culture (voir paragraphe Salle de culture) ;
- verrerie utilisée, réservée uniquement à ce type de travail ;
- nettoyage de la verrerie : immersion dans un bain d'acide nitrique à 10 % (une nuit), puis rinçage à l'eau bi-permutée trois à cinq fois et séchage en salle blanche spéciale. Cette salle est un laboratoire à empoussiérage contrôlé dans laquelle nous avons fait toutes nos manipulations. Ce laboratoire est conçu avec le minimum d'ameublement, canalisations et radiateurs sont encastrés sous-caisson, les murs recouverts de peinture glycérophtalique laquée blanche présentant, comme la salle de culture, une surface parfaitement lisse pour que la poussière n'accroche pas. Un sas vitré à l'entrée permet d'éviter l'apport direct d'air extérieur. La filtration absolue de l'air est obtenue à l'aide de deux filtres à base de cellulose, d'amiante et de fibre de verre, caractérisés par leur très haute efficacité (filtration à 99,99 % des particules $> 0,3 \mu\text{m}$) ;
- réactifs : les réactifs utilisés sont suprapur (voir 1.3.2.) ; les étalons, les attaques, les gammes, les dilutions doivent être préparés avec les mêmes réactifs, provenant des mêmes flacons. Il en est de même

pour l'eau de dilution. Les mesures (échantillons-étalons) doivent être faites à partir de milieux comparables, les méthodes physico-chimiques utilisées étant des méthodes comparatives.

Le chimiste doit éviter toute cause d'erreur (traces de doigts, transpiration, cendres de cigarette...), et dans le cas des éléments très sensibles à la contamination externe, il doit revêtir une blouse spéciale, 100 % polyester, et se couvrir la tête avec un capuchon en même tissu que la blouse (par exemple pour empêcher la contamination par le zinc contenu dans les cheveux).

1.4. Choix de la plante retenue.

Nous avons travaillé sur le blé (*Triticum aestivum* L.EM.THELL.), variété Top, semences certifiées venant de l'INRA de Versailles. C'est le blé d'hiver qui est le plus cultivé dans le monde. Nous avons choisi le blé car c'est une céréale très importante pour l'alimentation dans le monde entier et, tout particulièrement, pour la production nationale syrienne.

D'autre part, il est toujours utile, lors de recherches expérimentales, d'utiliser une plante comme le blé sur laquelle on a le maximum d'informations ; cela aide à comprendre les anomalies qui peuvent se produire au cours des expériences et on bénéficie des connaissances fournies par les travaux antérieurs.

Le blé (d'hiver et de printemps) est cité depuis 1946 par ROBBINS comme une plante intéressante pour la culture expérimentale du point de vue comportement et photopériodique (peu sensible à la réduction d'intensité lumineuse). Le blé, comme les autres céréales, est aussi utilisé pour l'étude des carences en cuivre, zinc, fer et manganèse (HEWITT, 1963). Aussi KING et al., en 1975, ont utilisé le blé pour le diagnostic de déficience en éléments traces.

Le blé, en tant que céréale, est connu comme étant une très bonne plante témoin dans les études concernant les besoins nutritifs des végétaux (BAROCCIO et al., 1976, BALIGAR et al., 1979).

D'ailleurs BROWN et al., en 1977, ont utilisé le blé pour déterminer pourquoi le cuivre influence davantage le stade de maturation et estimer son rôle comme élément essentiel pour le développement du blé.

Le blé est considéré comme un exemple représentatif de la sensibilité des céréales aux déficiences en cuivre (ROBIN et al., 1979).

1.5. Essais pratiques effectués.

Trois essais ont été effectués dans le cadre de notre étude. Les deux premiers sont identiques pour confirmer les résultats obtenus, le troisième essai est fait à partir de solutions de concentrations différentes en oligo-éléments, la possibilité d'enrichir les différentes parties du blé en ces oligo-éléments en fonction des différentes concentrations ainsi que l'accumulation des oligo-éléments dans certaines parties du blé.

1.5.1. Germination des graines de blé.

Les graines ont été stérilisées en les immergeant, pendant dix minutes, dans l'hypochlorite de calcium contenant 2 % de chlore qui est un facteur de protection efficace contre différentes infections. Ensuite, elles sont rincées plusieurs fois à l'eau bi-permutée puis, dans la salle de culture, nous avons fait germer ces graines dans des boîtes de Petri, parfaitement propres, sur papier filtre dépourvu d'oligo-éléments en les arrosant avec de l'eau bi-permutée jusqu'à germination. Une fois que les plantules atteignent 3-5 cm, elles sont transférées dans les tubes de culture.

2. TECHNIQUE D'ANALYSE.

Pour l'analyse des solutions nutritives et des plantes, nous avons fait appel aux techniques physico-chimiques d'analyse (spectrométrie d'absorp-

tion atomique en flamme et par voie électrothermique et spectrométrie d'absorption moléculaire). Ces techniques nous ont permis de multiplier les déterminations relatives aux micro-éléments dans les solutions nutritives et dans les différents organes de la plante. Ces méthodes d'analyse très précises exigent une préparation très soignée des échantillons afin d'avoir des résultats corrects et précis.

2.1. Eléments étudiés.

Les éléments étudiés, ici, sont les suivants :

2.1.1. Macro-éléments.

Parmi les macro-éléments, nous avons étudié les éléments qui sont le plus en rapport avec les effets des oligo-éléments qui sont notre préoccupation principale. Ces macro-éléments sont : potassium, magnésium, calcium et phosphore.

2.1.2. Oligo-éléments.

Nous avons travaillé sur les oligo-éléments qui nous ont paru les plus importants pour l'agriculture syrienne et posant des problèmes réels de toxicité surtout, parfois de carence. Ce sont : le fer, le zinc, le manganèse, le cuivre et le bore.

2.2. Préparation des échantillons de plantes pour l'analyse.

Les solutions nutritives sont dosées directement, après les avoir diluées si nécessaire. Les échantillons des plantes ont été préparés suivant les étapes ci-dessous.

2.2.1. Récolte et séchage des plantes.

A la fin de chaque essai, les plantes sont récoltées avec une pince nettoyée comme la verrerie (voir 1.3.6.), puis, pour éliminer les traces de solution nutritive qui restent fixées à l'extérieur des racines, ces dernières sont lavées rapidement afin de ne pas entraîner les éléments nutritifs hors des racines.

Les plantes de chaque traitement sont regroupées ; ensuite, elles sont divisées en cinq parties :

- racines (quantité recueillie : 100 mg),
- feuilles (quantité recueillie : 100 mg),
- gaines (quantité recueillie : 80 mg),
- graines (quantité recueillie : 60 mg),
- première feuille (quantité recueillie : environ 30 mg) (cas du troisième essai).

Chaque partie est mise en capsule de platine pour éviter la contamination, séchée immédiatement pour réduire les changements biologiques et chimiques (LOCKMAN, 1970) dans un four à 70°C pendant 48 heures ; ensuite, refroidie dans un dessiccateur pendant 30 minutes.

Elles sont pesées séparément et soigneusement.

Les résultats sont présentés en pourcentage de matière sèche.

2.2.2. Calcination des plantes.

Les échantillons (30 à 100 mg) mis en capsule pour être calcinés dans un moufle en silice, sont soumis à une augmentation progressive de 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 minutes, 200°C pendant une heure, 250°C également pendant une heure et 400°C pendant plus de quatre heures. On obtient ainsi des cendres parfaitement blanches. Les échantillons sont refroidis au dessiccateur pendant trente minutes puis attaqués par 0,2 ml d'acide nitrique à 50 % préparé à partir de HNO₃ concentré (suprapur). On ajoute quelques gouttes d'eau bi-permutée et on agite bien pour mélanger.

Les échantillons recouverts d'un verre de montre sont mis sur plaque chauffante à 100°C jusqu'à évaporation totale.

On reprend les résidus par 0,4 ml d'acide nitrique à 50 %, on transvase dans des fioles de 10 ml et on ajuste à 10 ml avec de l'eau bi-permutée. De cette façon les échantillons sont en solution nitrique à 2 %. Les solutions étalons sont faites exactement dans le même milieu.

2.3. Spectrométrie d'absorption atomique avec flamme.

La connaissance des oligo-éléments et de leur rôle dans les milieux biologiques est étroitement liée au progrès des méthodes d'analyses. Ainsi la spectrométrie d'absorption atomique aide à mieux comprendre le rôle de ces éléments en permettant de résoudre, de façon pratique, un bon nombre de problèmes de leur analyse.

Elle se veut aussi une méthode instrumentale rapide, d'exécution relativement facile. Nous rappelons ici, brièvement, les principes de base de cette technique.

2.3.1. 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 $h\nu$.

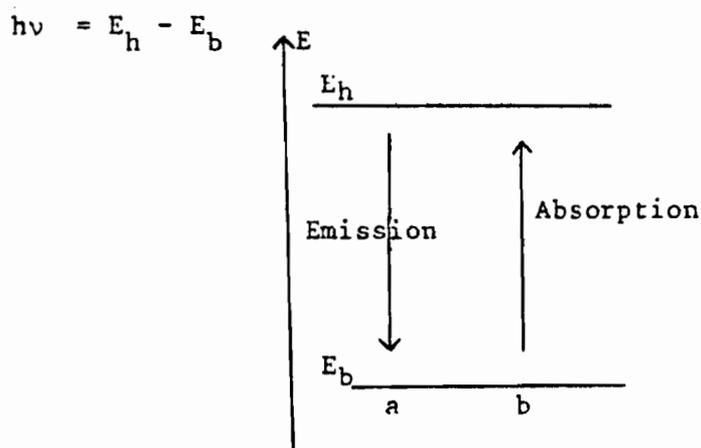


Figure 1 - Emission-absorption.

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.

L'appareil utilisé est un spectromètre classique de type Perkin-Elmer modèle "303".

2.3.2. Dosage du calcium, du magnésium et du potassium.

Les échantillons de solutions nutritives sont dilués convenablement avec une solution d'acide chlorhydrique 1 % et de lanthane 1 %.

Tandis que les échantillons de solutions des plantes sont dilués aussi convenablement mais avec une solution d'acide nitrique 2 % et de lanthane 0,5 % ; le lanthane a été utilisé pour corriger les interférences. Etant donné que les solutions de plantes dont nous disposons sont limitées en quantité, nous avons eu recours, pour doser ces trois éléments, à un dosage microchimique (prise d'essai 100 μ l). Les conditions opératoires et les propriétés d'analyse sont résumées dans le tableau 4.

TABLEAU 4 - Conditions analytiques utilisées pour le dosage de Ca, Mg, K, en absorption atomique avec flamme (Perkin-Elmer 303).

Elément	Raie nm	Flamme	Fente mm	Réseau	Brûleur	Gaz	Limite de détection µg/ml	Gamme µg/ml	Sensibilité µg/ml/1 % absorption
Ca	422,7	Réd *	1,0	visible	grand 3 fentes	air-C ₂ H ₂	0,01	0 - 2 - 4 - 6 - 8	0,05
Mg	285,2	Réd *	3,0	ultra- visible	grand 3 fentes	air-C ₂ H ₂	0,003	0 - 0,2 - 0,5 - 0,75 - 1,0 - 1,5	0,01
K	766,5	Oxy ***	1,0	visible	petit 1 fente	air-C ₂ H ₂	0,01	0 - 2,5 - 5 - 7,5 - 10	0,01

* Flamme réductrice avec excès de combustible

*** Flamme oxydatrice avec excès de comburant.

2.4. Spectrométrie d'absorption moléculaire.

2.4.1. 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.

2.4.2. 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 avec l'azométhine H en milieu tamponné (pH environ 5) et mesuré spectrométriquement à 420 nm.

- 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 phosphomolybdique et réduction par l'acide ascorbique, une coloration bleue se développe. Mesure spectrophotométrique 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. En nous appuyant sur ces vingt mesures, nous avons fait le calcul statistique pour le bore et le fer car leur dosage demande beaucoup de précision. Ce calcul est donné dans le tableau 5.

2.5. Spectrométrie d'absorption atomique en four appliquée au dosage des éléments traces.

Si les flammes restent le moyen le plus fréquemment utilisé comme source d'atomisation, les systèmes d'atomisation par voie électrothermique 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).

Nous ne donnerons pas ici un exposé complet sur la spectrométrie d'absorption atomique sans flamme et ses possibilités, nous rappèlerons seulement quelques principes généraux.

Le but de cette étude est de mettre au point de nouvelles méthodes de microanalyse, sur des quantités très petites de plantes, et de chercher les conditions optimales d'analyse du cuivre, du zinc et du manganèse dans le milieu nutritif et dans les échantillons de blé ; ceci constitue, avec les autres analyses, la partie analytique de ce travail.

2.5.1. Généralités et principe.

L'absorption atomique par voie électrothermique est, en effet, fréquemment employée dans le domaine des oligo-éléments en agriculture (LACATUSU et al., 1977, HERA et al., 1977), surtout en raison de sa très grande sensibilité et des possibilités qu'elle offre de travailler sur de très petites quantités d'échantillons : 10 à 50 μ l de solution. Elle nous a permis ainsi la micro-analyse des oligo-éléments.

TABLEAU 5 - Etude statistique de la précision du dosage du bore et du fer.

	BORE ($\mu\text{g/ml}$)		FER ($\mu\text{g/ml}$)	
	Solutions nutritives	Solutions des plantes	Solutions nutritives	Solutions des plantes
1	0,330	0,81	0,89	2,40
2	0,335	0,80	0,87	2,40
3	0,335	0,82	0,89	2,40
4	0,335	0,81	0,89	2,40
5	0,335	0,81	0,89	2,45
6	0,335	0,81	0,89	2,40
7	0,338	0,82	0,91	2,45
8	0,335	0,81	0,87	2,45
9	0,338	0,81	0,89	2,40
10	0,338	0,82	0,87	2,45
11	0,338	0,82	0,89	2,45
12	0,338	0,82	0,90	2,40
13	0,338	0,82	0,90	2,45
14	0,336	0,82	0,89	2,45
15	0,335	0,82	0,89	2,45
16	0,338	0,82	0,89	2,45
17	0,338	0,82	0,89	
18	0,338	0,82	0,89	
19	0,338	0,81	0,90	
20	0,335	0,81	0,89	
\bar{x}	0,3364	0,8150	0,8895	2,4281
M	0,3380	0,8200	0,8900	2,4500
S ²	0,00000441	0,0000373	0,0001	0,007
S	0,0021	0,0061	0,0100	0,0256
C.V.%	0,6	0,7	1,1	1,1

\bar{x} : Moyenne des données.

M : Médiane.

S² : Variance.

S : Ecart-type.

C.V. : Coefficient de variation.

Le principe est le même que celui de l'absorption atomique avec flamme (voir 2.3). Un faisceau lumineux monochromatique d'intensité I_0 traverse une population d'atomes produit à partir de l'échantillon. Si I est le flux après absorption, la valeur donnée par le récepteur de mesure est de la forme $A = \log I_0/I$; cette valeur traduit l'absorbance si I_0 est le flux transmis dans l'essai à blanc et I le flux transmis par la solution d'analyse.

- Appareillage.

Nous avons utilisé un spectrophotomètre d'absorption atomique mono-faisceau mono-canal (Perkin-Elmer, type 300) dans lequel le système nébuliseur-brûleur est remplacé par un four en graphite (de plus en plus retenu), chauffé par effet joule ; le four utilisé est un Perkin-Elmer type HGA 72. Ce four permet la montée de la température de 0° à 2700°C de façon à pouvoir sécher, décomposer puis atomiser l'échantillon dans des conditions thermiques et de température préalablement déterminées. Le four doit être porté à la température maximale plusieurs fois avant toute analyse afin de supprimer les absorptions parasites (spécifiques ou non) observées souvent avec les fours neufs. La très grande sensibilité de la méthode nous permet l'analyse directe des éléments, évitant ainsi des contaminations toujours possibles au cours d'une concentration ou d'une séparation d'éléments.

- Procédure d'analyse.

Une prise d'essai de $10 \mu\text{l}$ exactement est introduite dans le four à l'aide d'une micropipette. L'analyse faite dans un environnement inerte d'argon évite la formation d'oxyde et 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.

2.5.2. Mise au point des nouvelles méthodes de microanalyse sur des quantités très petites de végétaux.

La technique d'absorption atomique sans flamme, bien que d'utilisation très délicate, nous a permis d'améliorer l'analyse des oligo-éléments dans les végétaux.

Nous nous sommes servis de cette technique pour pouvoir doser, avec une grande sensibilité, les oligo-éléments ainsi que certains éléments majeurs qui nous intéressent, à partir de très petites quantités de végétaux allant jusqu'à 30 mg de matière végétale. Ces dosages ont pu être effectués après la recherche de conditions analytiques non déterminées antérieurement.

Cette méthode nécessite obligatoirement peu de manipulations et elle permet en même temps l'utilisation d'acide nitrique qui forme des nitrates plus stables au moment de la calcination et de l'atomisation que les chlorures.

L'importance de cette méthode est due au fait qu'elle donne la possibilité d'avoir des résultats suffisamment précis pour comprendre l'assimilabilité et l'accumulation relative des éléments nutritifs dans les différentes parties de la plante (racine, feuille ...) lorsque l'on dispose, seulement, de très petites quantités de matière végétale (voir 2.2.) et qu'elle permet également d'obtenir ces résultats rapidement (à partir d'essais courts et pour les premiers stades de développement).

Tous ce qui précède requiert une étude sérieuse, d'autant plus que le milieu est complexe, composé d'un certains nombres d'éléments chimiques ; le dosage de ces éléments en absorption atomique en four est aussi soumis à de multiples interactions de tout ordre qui sont des causes d'erreur importantes si l'on n'en tient pas compte. En d'autres termes, il importe, préalablement à toute analyse, de connaître ces causes d'erreurs, notamment par des essais préliminaires, surtout dans l'analyse des plantes dont la composition minérale diffère énormément pour une même espèce et même pour les différents organes.

La recherche des conditions thermiques de chaque élément sera décrite plus loin ainsi que les problèmes spécifiques d'analyse des plantes dont nous nous sommes préoccupés afin de les réduire au minimum.

2.5.3. Adaptation des méthodes de dosage des oligo-éléments aux solutions nutritives.

Le dosage des oligo-éléments, dans les solutions nutritives, a été fait après certaines adaptations des méthodes déjà étudiées et utilisées. Ces adaptations sont nécessitées, d'une part par notre milieu complexe qui exige, dans certains cas, la préparation de solutions très diluées (cas du zinc par exemple), et surtout par les conditions analytiques qui dépendent de la composition du milieu.

Les conditions de dosage varient d'un milieu à l'autre ; à titre d'exemple, nous avons constaté qu'un simple changement d'acide utilisé pour la dilution des échantillons peut entraîner une variation de 200-400°C dans le programme thermique, la température varie de 250-1000°C pour le cycle de décomposition selon la nature de l'échantillon ; ainsi, on conçoit l'importance du choix du programme de décomposition et d'atomisation avant l'analyse des échantillons.

Il en est de même pour l'analyse des solutions nutritives.

2.5.4. Problèmes particuliers liés à l'analyse des plantes et des solutions nutritives.

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.

2.5.4.1. *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 cor-

recteur 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 utilisé 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.

2.5.4.2. Effet de la matrice.

Les effets de matrice sont les 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.

2.5.4.3. Sensibilités obtenues.

La sensibilité que l'on peut atteindre en absorption atomique "en four" est très 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 6.

TABLEAU 6 - Données analytiques sur le dosage en atomisation électrothermique.

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

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

2.5.4.4. 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 (voir 1.3.6.),
- utilisation des réactifs spécialement purifiés,

- limitation des quantités d'acides utilisés,
- préparation des solutions d'analyse, ainsi que l'installation du spectromètre en salle dépoussiérée (voir 1.3.6.),
- exécution d'essai "blanc" comprenant toutes les opérations analytiques.

2.5.5. 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'atomisation 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 10 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.

Pour chaque élément, la variation de température est représentée, ci-après, par les graphiques.

2.5.5.1. Recherche des programmes thermiques pour le dosage dans les solutions nutritives.

- Dosage du cuivre.

Nous avons tracé, sur un même graphique, les deux courbes de décomposition et d'atomisation en faisant les mesures point par point, sur une prise d'essai de 10 µl de solution étalon de cuivre à 0,01 µg/ml en solution nutritive exempte des autres oligo-éléments (milieu identique aux échantillons). La température est augmentée progressivement en tenant compte des paramètres suivants :

	Point d'ébullition	Point de fusion
Cu	2595°C	1083°C

Dans un premier temps, on fixe la température d'atomisation arbitrairement à 2600°C (température supérieure à la température d'ébullition du cuivre) et on augmente régulièrement la température de décomposition (T.D.). Ensuite, on mesure chaque fois l'absorbance (figure 2) ; la température optimale de décomposition retenue correspond alors à la dernière mesure pour laquelle l'absorbance commence à décroître (figure 2).

On procède de la même façon pour déterminer la température optimale d'atomisation.

Le programme de chauffage retenu est le suivant :

Cycle	Température (°C)	Temps (s)
Séchage	100	25
Décomposition	800	35
Atomisation	2450	4
Refroidissement	0	30

Gamme étalon : 0,001 - 0,002 - 0,003 - 0,005 - 0,01 µg/ml (figure 3).

FOUR HGA 72

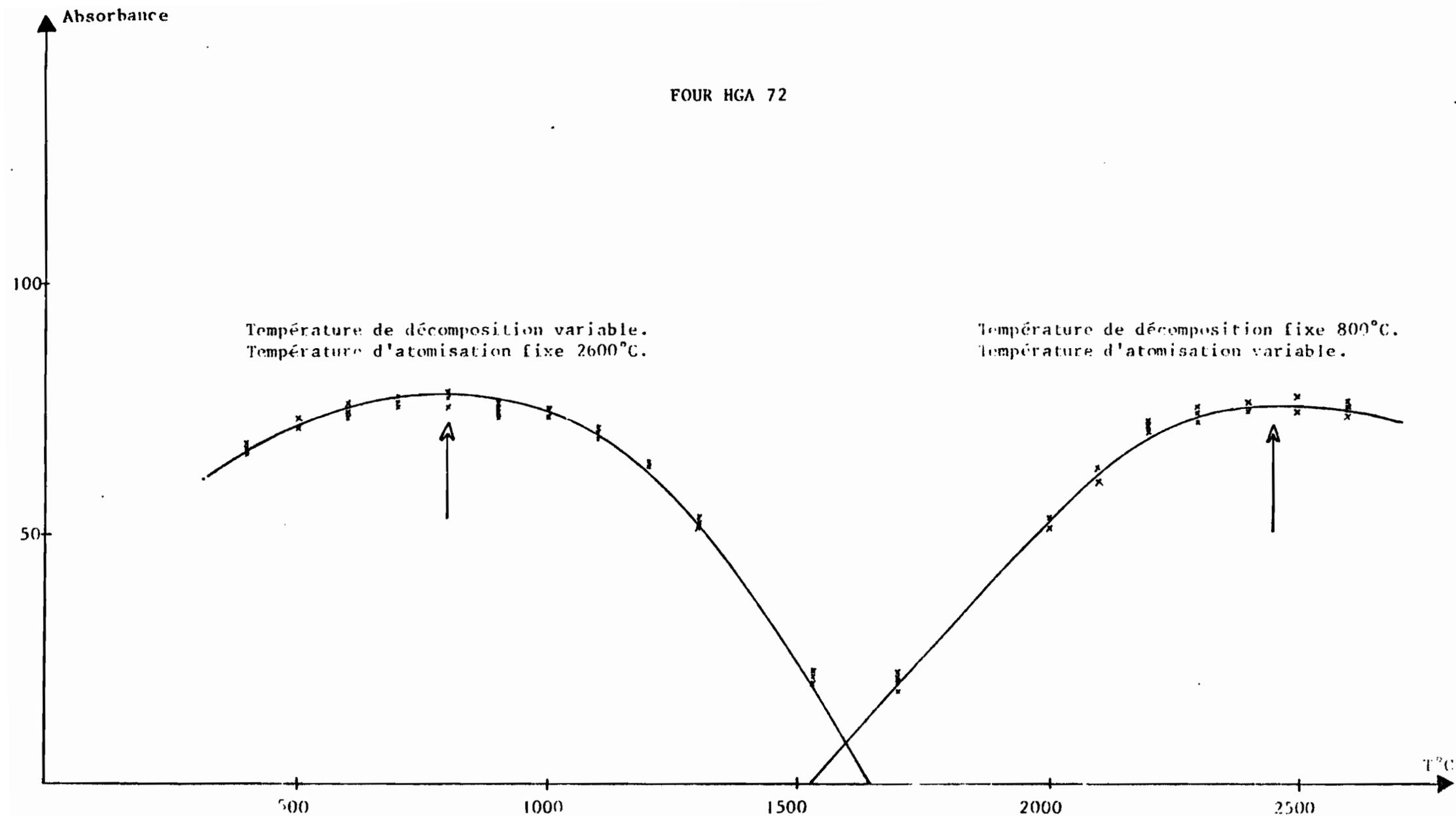


FIGURE 2 - Détermination des températures de décomposition et d'atomisation du cuivre.
 λ 3247 Å
Milieu solution nutritive exempte d'oligo-élément
Prise d'essai 10 μ l.

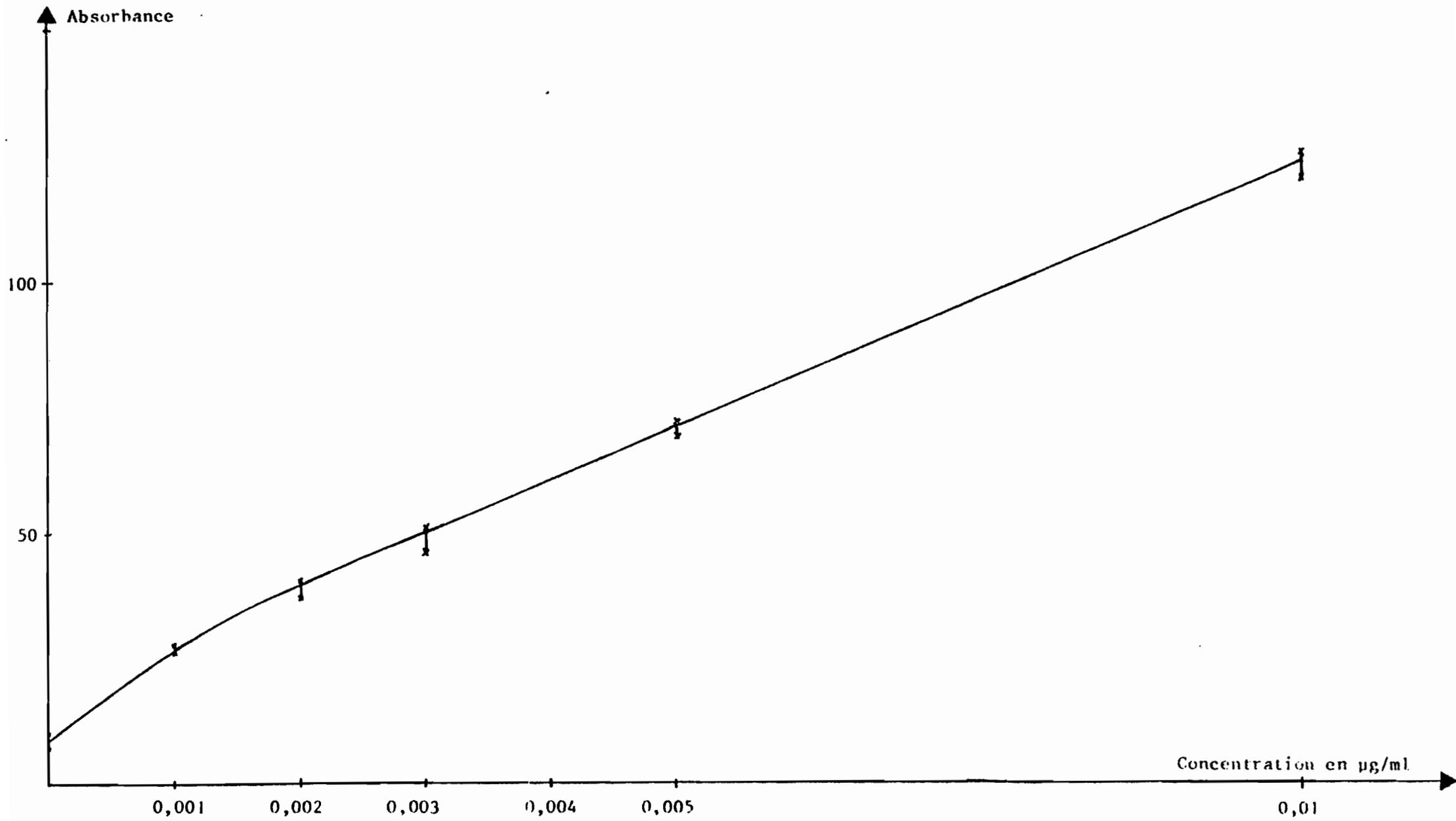


FIGURE 3 - Courbe d'étalonnage du cuivre.

TABEAU 7 - Etude statistique de la précision du dosage de Cu, Mn et Zn dans les solutions nutritives.

	Cu	Mn	Zn
	*	*	*
1	115,0	87,0	118,0
2	115,0	85,0	122,0
3	115,0	90,0	114,0
4	116,0	88,0	115,0
5	114,0	86,0	120,0
6	112,0	89,0	120,0
7	112,0	91,0	118,0
8	112,0	86,0	122,0
9	114,0	87,0	125,0
10	113,0	92,0	116,0
11	117,0	90,0	120,0
12	115,0	90,0	124,0
13	112,0	91,0	124,0
14	115,0	88,0	121,0
15	112,0	88,0	116,0
16	114,0	87,0	123,0
17	110,0	86,0	123,0
18	110,0	91,0	126,0
19	111,0	94,0	120,0
20	115,0	84,0	113,0
\bar{x}	113,450	88,50	120,0
M	114,0	88,00	120
S ²	3,945	6,684	14,211
S	1,986	2,585	3,770
C.V. %	1,8	2,9	3,1

* : Les chiffres (1 à 20) représentent les mesures enregistrées par le récepteur.

\bar{x} : Moyenne.

M : Médiane.

S² : Variance.

S : Ecart-type.

C.V. : Coefficient de variation.

Les échantillons sont dosés trois à cinq fois ; les résultats retenus sont la moyenne arithmétique de ces répétitions.

Le contrôle de la sensibilité et de la limite de détection est donné dans le tableau 6.

Le contrôle de la précision a été fait à partir d'une répétition de vingt mesures d'un même échantillon pris, au hasard, dans une série ; en nous appuyant sur ces vingt mesures, nous avons calculé l'écart-type et le coefficient de variation.

La précision obtenue est très satisfaisante : 1,8.

Les calculs statistiques sont donnés dans le tableau 7.

- Dosage du manganèse et du zinc.

En utilisant des méthodes semblables à celles utilisées pour le cuivre, nous avons établi les programmes thermiques présentés dans le tableau 8.

TABLEAU 8 - Programmes thermiques pour le dosage du manganèse et du zinc dans les solutions nutritives.

	Cycle	Température (°C)	Temps (s)
Mn	Séchage	100	20
	Décomposition	1150	30
	Atomisation	2600	5
	Refroidissement	0	30
Zn	Séchage	100	20
	Décomposition	600	40
	Atomisation	2100	4
	Refroidissement	0	25

Gammes étalons :

- pour le manganèse : 0,02 - 0,03 - 0,04 - 0,05 µg/ml
- pour le zinc : 0,002 - 0,005 - 0,01 - 0,05 µg/ml.

L'étude statistique est donnée dans le tableau 7.

1.5.5.2. Recherche des programmes thermiques pour le dosage dans les solutions de plantes.

Afin de déterminer le programme thermique pour le dosage du cuivre, du manganèse et du zinc dans les solutions de plantes, nous avons eu recours aux méthodes utilisées pour le dosage dans les solutions nutritives.

Les températures optimales retenues, ainsi que le temps nécessaire pour chaque cycle, sont donnés dans le tableau 9.

Le tableau 10 montre l'étude statistique du contrôle de précision du dosage de ces trois oligo-éléments. Cette étude est faite par une méthode identique à celle utilisée pour le dosage de ces trois oligo-éléments dans les solutions nutritives précédentes.

TABLEAU 9 - Programmes thermiques retenus pour le dosage du cuivre, du manganèse et du zinc dans les solutions de plantes.

	Cycle	Température (°C)	Temps (s)
Cu	Séchage	100	20
	Décomposition	700	35
	Atomisation	2300	5
	Refroidissement	0	30
Mn	Séchage	100	25
	Décomposition	1150	35
	Atomisation	2400	6
	Refroidissement	0	30
Zn	Séchage	100	20
	Décomposition	700	40
	Atomisation	1700	4
	Refroidissement	0	25

TABLEAU 10 - Etude statistique du dosage du Cu, Mn et Zn dans les solutions de plantes.

	Cu	Mn	Zn
	*	*	*
1	128,0	66,0	36,0
2	130,0	70,0	34,0
3	136,0	71,0	34,0
4	132,0	72,0	32,0
5	129,0	71,0	31,0
6	132,0	73,0	31,0
7	137,0	72,0	32,0
8	126,0	73,0	33,0
9	127,0	76,0	31,0
10	138,0	74,0	32,0
11	128,0	75,0	33,0
12	130,0	73,0	31,0
13	129,0	74,0	32,0
14	132,0	75,0	33,0
15	126,0	72,0	32,0
16	130,0	75,0	33,0
17	134,0	73,0	33,0
18	136,0	71,0	33,0
19	126,0	75,0	33,0
20	128,0	72,0	32,0
\bar{x}	130,70	72,65	32,55
M	130,00	73,00	32,55
S ²	14,432	5,187	1,524
S	3,799	2,277	1,234
C.V. Z	2,9	3,1	3,8

* : Les chiffres (1 à 20) représentent les mesures d'un même échantillon enregistrées par le récepteur.

\bar{x} : Moyenne.

M : Médiane.

S² : Variance.

S : Ecart-type.

C.V. : Coefficient de variation.

Gammes étalons :

- pour le cuivre : 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 µg/ml
- pour le manganèse : 0,01 - 0,02 - 0,025 - 0,03 - 0,04 - 0,05 µg/ml
- pour le zinc : 0,001 - 0,002 - 0,003 - 0,004 - 0,005 µg/ml.

Ces gammes étalons sont faites dans le même milieu que les échantillons (milieu acide nitrique à 2 %).

2.5.6. 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 le Comité Inter-Instituts d'Etudes des Techniques de Diagnostic Foliaire (CII). Nous avons dosé ces échantillons de référence dans les mêmes conditions que celles de nos échantillons. Nous présentons les résultats dans le tableau 11.

Nous avons comparé nos résultats aux résultats obtenus par les laboratoires du CII, en les traitant statistiquement ; il est nécessaire de noter que la différence du coefficient de variation existant entre nos résultats et ceux du CII vient du fait que ni les conditions analytiques ni les méthodes d'analyse ne sont les mêmes, et que les résultats donnés par le CII sont les moyennes des résultats de 9 à 18 laboratoires, comme l'indique le tableau 11.

Nous avons également contrôlé la justesse du dosage en comparant les résultats de cette étude avec ceux du CII ; le tableau 12 donne ces résultats avec la différence en pourcentage. Nous constatons que nos résultats sont très satisfaisants, la différence ne dépassant en aucun cas 10 %.

TABLEAU 11 - Reproductibilité des résultats du dosage des échantillons de référence (maïs et foin) du Comité Inter-Instituts (CII) (PINTA et CII, 1975). Résultats comparatifs entre les méthodes de référence du CII et celles de cette étude (moyennes 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	73,6150	26,1425	11,41	245,8	70,59	11,850	249,190	68,6119
M	11,650	66,700	27,000	11,200	76,7650	26,2425	11,40	242,0	70,00	11,850	247,390	68,4850
S ²	2,569	21,401	12,526	0,0521	22,5688	0,8222				0,0517	24,40	2,8134
S	1,611	4,626	3,539	0,2283	4,7507	0,9068	1,266	29,77	8,66	0,2273	4,9396	1,6773
CV %	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 de données pour cette étude et nombre de laboratoires ayant effectué l'analyse pour le CII.
 \bar{x} : Moyenne arithmétique des données.
M : Médiane.
S² : Variance.
S : Ecart-type.
CV : Coefficient de variation = $\left(\frac{S \times 100}{\bar{x}}\right)$.

TABLEAU 12 - Justesse des résultats.
 Comparaison entre les résultats
 obtenus par le CII et cette étude
 (résultats exprimés en ppm).

	MAIS		
	CII	Cette étude	%
Cu	11,800	11,290	4,32
Mn	66,094	73,6150	10,217
Zn	28,027	26,1425	6,724
Fe	259,281	235	9,365

	FOIN		
	CII	Cette étude	%
Cu	11,41	11,850	3,856
Mn	245,8	249,190	1,379
Zn	70,59	68,6119	2,802
Fe	202,70	210	3,601

% : Différence en pourcentage entre les résultats obtenus dans cette étude et les résultats du CII.

Chapitre II.

RESULTATS.

1. EXAMEN MORPHOLOGIQUE DES PLANTES.

Au cours des trois essais effectués, des remarques et des observations journalières ont été faites sur la physionomie des plantes, ainsi que l'examen des signes visibles de maladie nutritionnelle (symptomatologie) car ceux-ci renseignent parfois, d'une façon décisive, sur la cause de la maladie nutritionnelle ; des confusions sont toutefois possibles avec des symptômes physiologiques.

Il n'empêche que dans certains cas l'examen de ces signes est un facteur à considérer : une carence cuprique se manifeste par une décoloration, jusqu'à teinte blanche, des feuilles surtout les plus jeunes ; de même, une carence manganique se manifeste par une chlorose avec des taches brunes longitudinales. Nous avons remarqué ces symptômes dans les deux premiers essais, sur le blé cultivé en solution nutritive dans laquelle nous avons mis uniquement les macro-éléments et le fer (S.N.M.) ; en plus, nous avons observé que les racines ne se développent pas régulièrement en l'absence du manganèse.

En outre, nous avons bien observé que la croissance est très rapide pendant la première semaine de l'essai. Pour le premier essai, cette croissance est de 18,6 cm pour le blé cultivé en milieu nutritif complet (S.N.C.) (tableau 14). Pour le deuxième essai, elle est de 16,4 cm pour le blé cul-

tivé en milieu nutritif contenant des macro-éléments. Pour le troisième essai, elle est, pour les trois premiers jours, de 12,68 cm dans la solution nutritive complète (S.N.C.), de 11,09 cm dans la solution nutritive complète contenant une concentration en zinc cinq fois plus forte que la S.N.C. normale (S.N.C. + Zn x 5), de 10,46 cm dans la S.N.C. ayant, en plus, une concentration en fer trois fois plus forte que la normale (S.N.C. + Fe x 3), de 11,40 cm dans la S.N.C. ayant une concentration en bore cinq fois plus forte que la normale (S.N.C. + B x 5), de 9,86 cm dans la S.N.C. ayant, en plus, une concentration en manganèse cinq fois plus forte (S.N.C. + Mn x 5), et de 11,18 cm dans la S.N.C. ayant, en plus, une concentration en cuivre cinq fois plus forte (S.N.C. + Cu x 5).

Les racines secondaires (radicelles) des plantes cultivées en solution nutritive complète (S.N.C.) poussent beaucoup mieux que celles des plantes cultivées en solution nutritive des macro-éléments (S.N.M.) ; ceci a été observé sur les deux premiers essais, ainsi à la fin de la quatrième semaine les limbes foliaires terminaux des plantes cultivées en solution (S.N.M.) deviennent jaune foncé.

Au cours du troisième essai qui a été fait à partir de solutions nutritives ayant des concentrations en excès des oligo-éléments, nous avons constaté les signes visibles suivants (voir photos) :

- les plantes cultivées sur solution nutritive complète (S.N.C.), ayant en plus une concentration en bore cinq fois plus forte que la normale (la concentration en ppm est donnée dans le tableau 13), ont des apex qui deviennent jaunes à partir de la deuxième semaine, puis bruns et qui, plus tard, meurent (ceci a été observé sur les organes aériens, surtout les plus âgés) ;
- le blé paraît sensible à la toxicité du cuivre car les plantes se développent mal dans la solution nutritive qui contient une concentration en cuivre cinq fois plus forte que la normale et les symptômes commencent à apparaître sur les bords des feuilles par une couleur jaune foncé et à partir de la quatrième semaine les feuilles s'enroulent longitudinalement ;
- les plantes cultivées sur solution nutritive complète avec excès de manganèse poussent moins bien dès le début de l'essai sans que l'on puisse remarquer beaucoup de symptômes visibles sur la plante ;
- par contre, le blé ne semble pas sensible à la présence d'une concen-

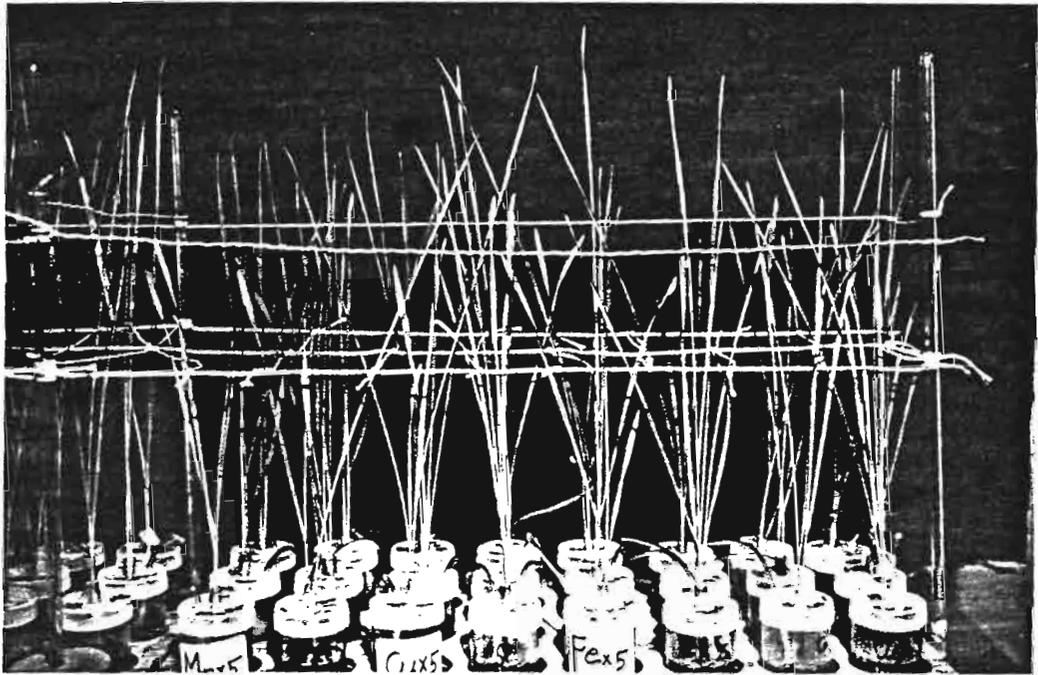


PHOTO 3 - Vue générale d'un essai de culture.

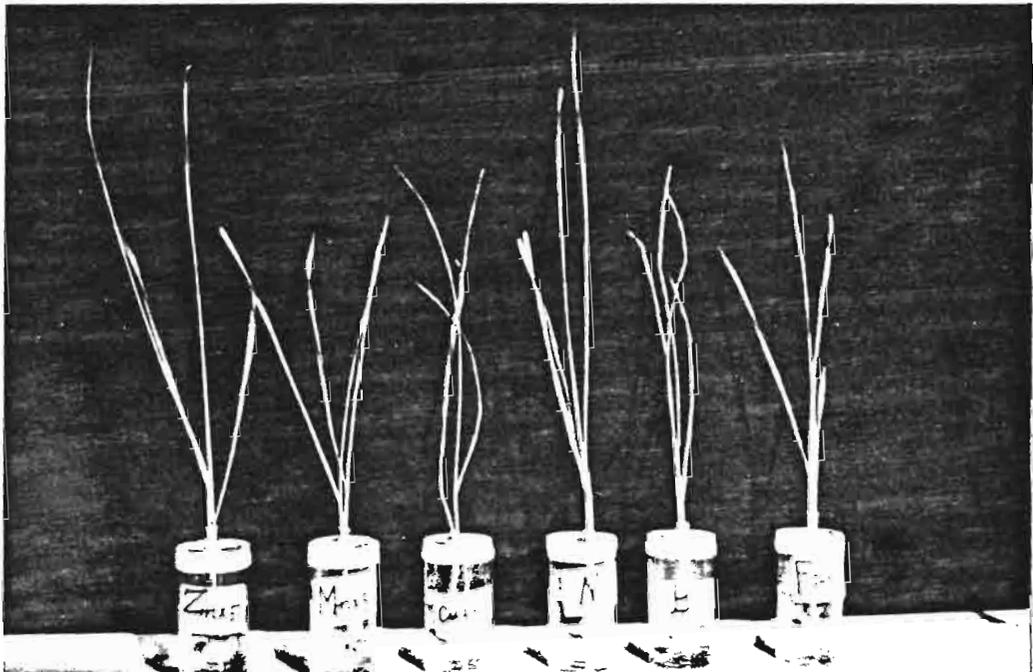


PHOTO 4 - Culture du blé dans des solutions ayant des concentrations différentes en oligo-éléments. (Photo prise le 22ème jour de l'essai).

TABLEAU 13 - Concentration des oligo-éléments quand ils existent dans la solution nutritive complète en concentration cinq fois plus forte (S.N.C. + oligo-éléments x 5).

Solution nutritive (S.N.)	Concentration de l'oligo-élément en ppm
S.N.C. + B x 5	2,495
S.N.C. + Zn x 5	0,25
S.N.C. + Cu x 5	0,1015
S.N.C. + Mn x 5	2,485
S.N.C. + Fe x 3	4,56

tration en zinc cinq fois plus forte que le témoin , nous avons remarqué que les plantes supportent le taux car les symptômes de toxicité n'apparaissent pas.

2. MESURE DE LA CROISSANCE : HAUTEUR DES PLANTES A DIFFERENTS STADES DES ESSAIS.

Nous avons mesuré, à différentes étapes du développement, la hauteur des plantes dans les différents traitements de chaque essai pour connaître la vitesse de croissance des plantes en relation avec l'absorption des éléments minéraux ; la hauteur des plantes a été mesurée dans trois tubes sur neuf dans chaque traitement pour les deux premiers essais, dans quatre tubes sur huit dans chaque traitement pour le troisième essai. Nous avons tracé les courbes de croissance des plantes en fonction du temps, à partir des moyennes qui ont été calculées sur l'ensemble des mesures faites cha-

FIGURE 4 - Croissance des plantes cultivées en différents milieux nutritifs.
"PREMIER ESSAI".

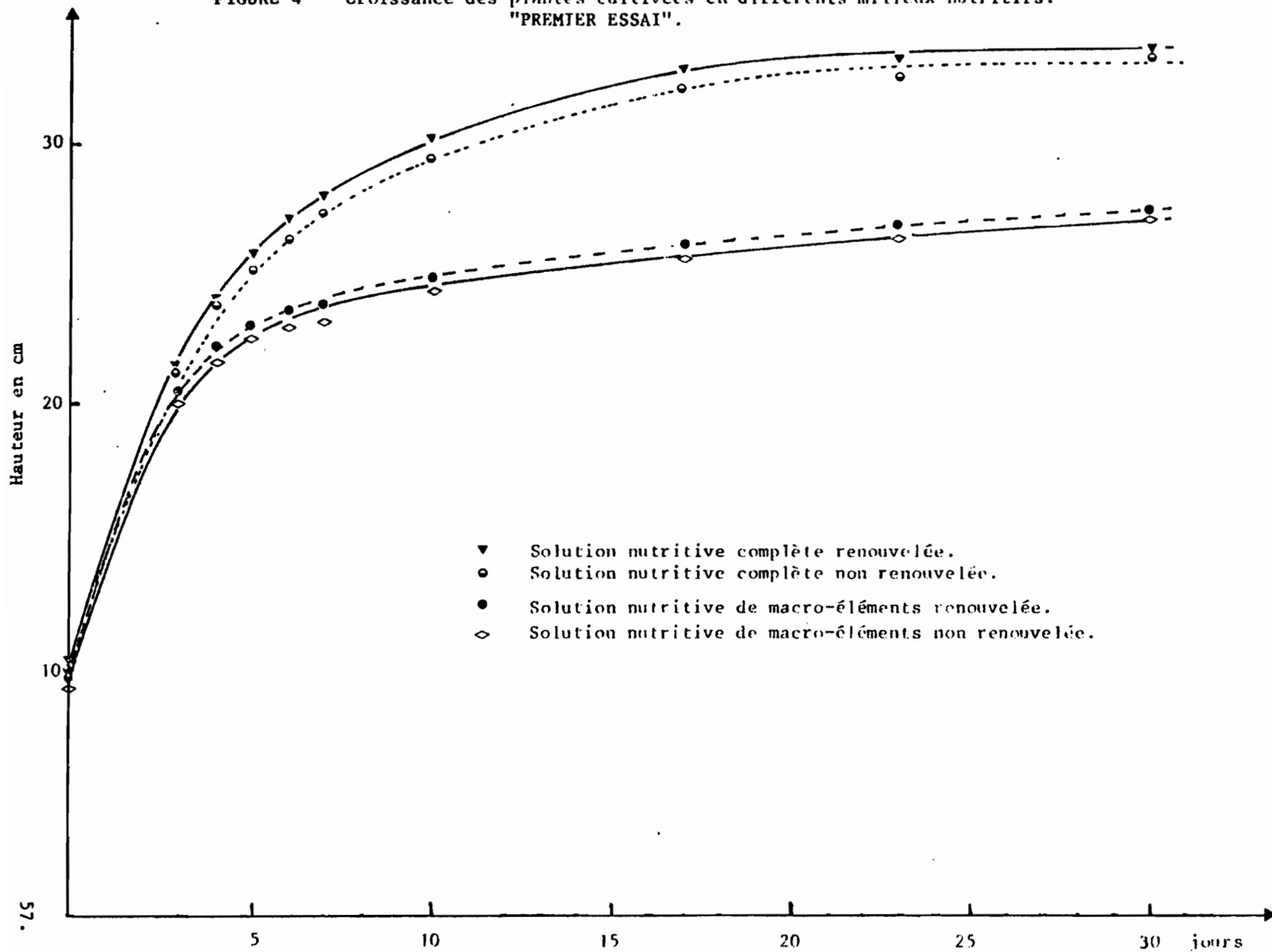


FIGURE 5 - Croissance des plantes cultivées en différents milieux nutritifs.
"DEUXIEME ESSAI".

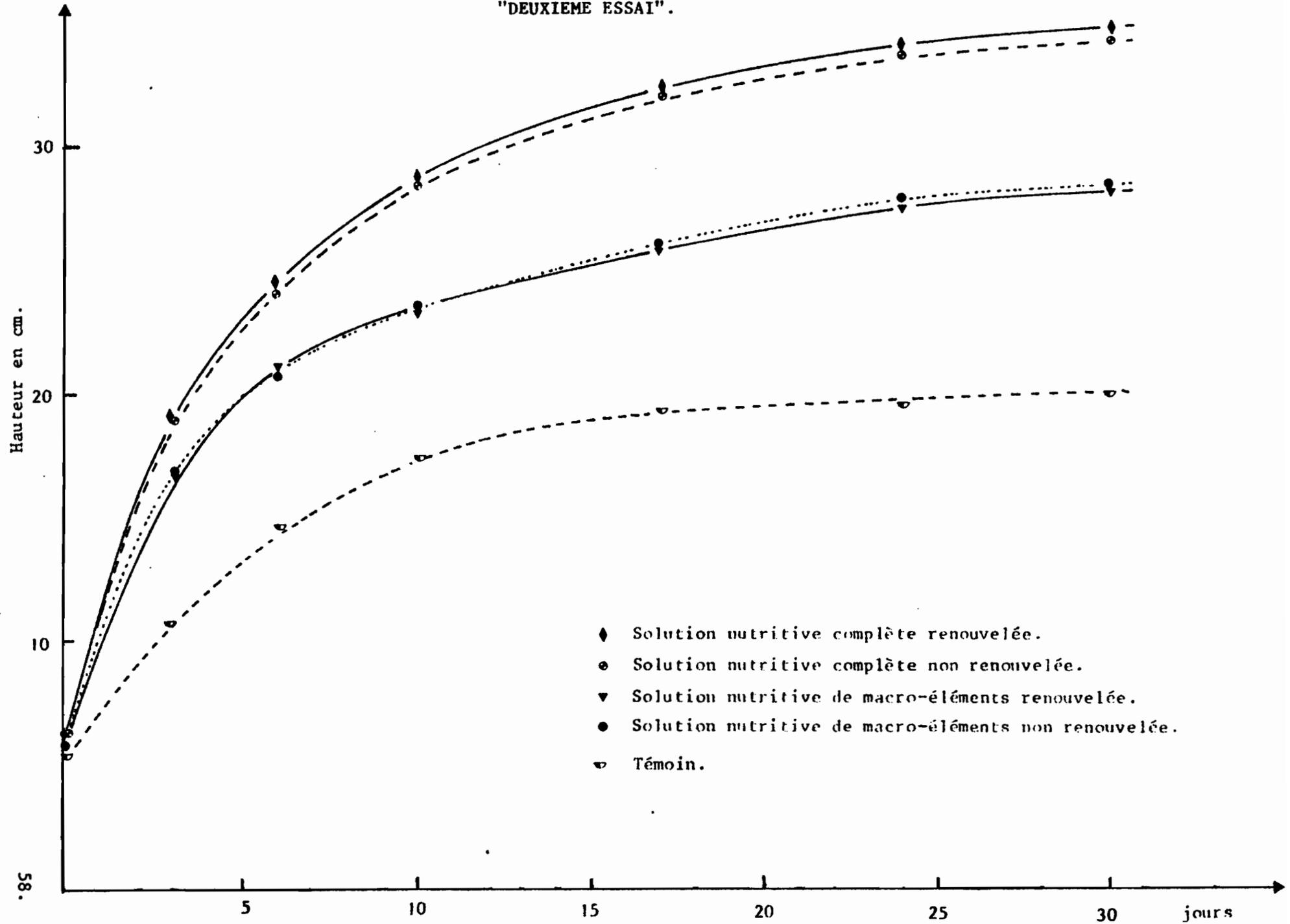


FIGURE 6 - Croissance des plantes cultivées en différents milieux nutritifs.
"TROISIEME ESSAI".

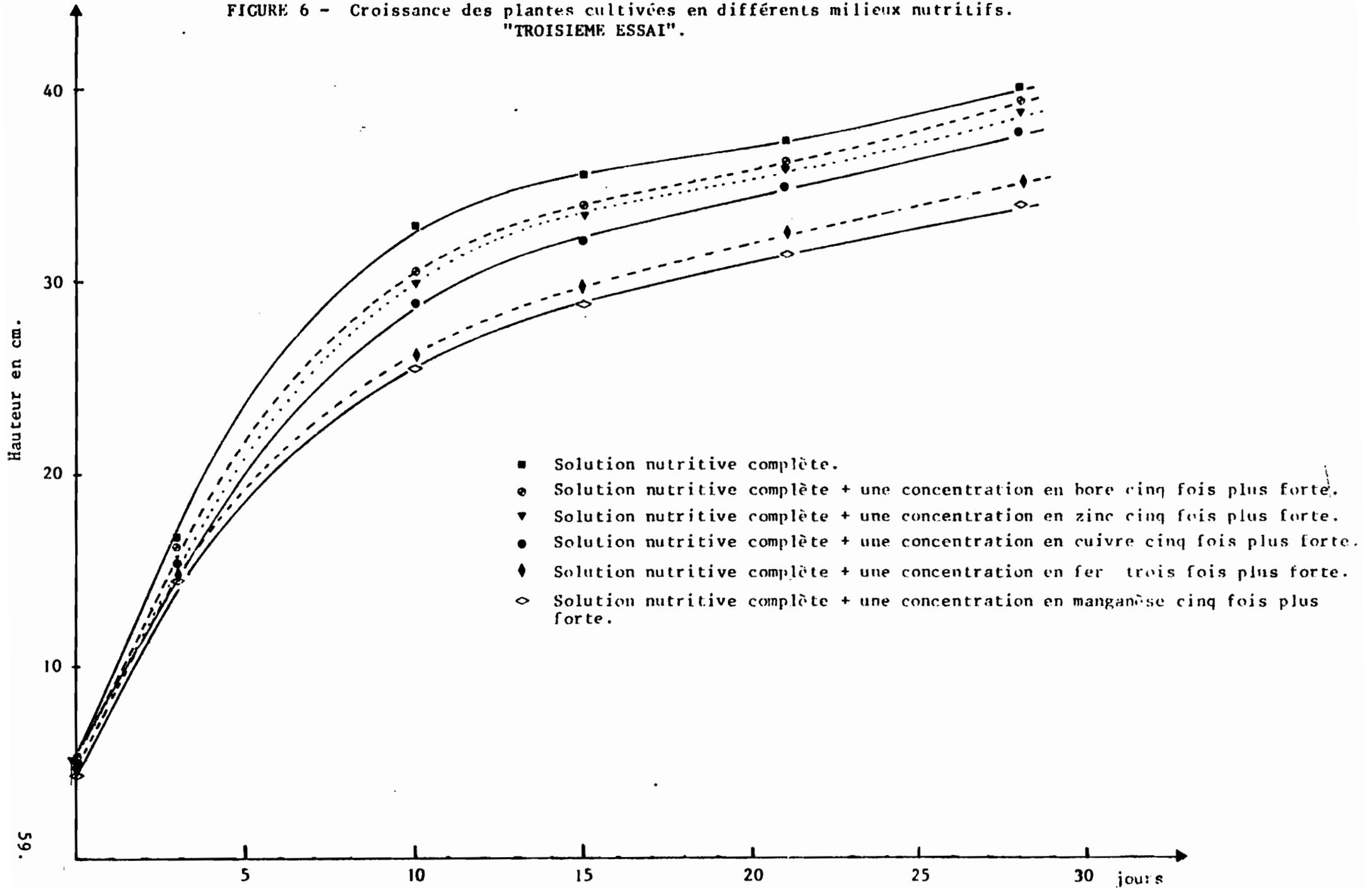


TABLEAU 14 - Hauteur des plantes en fonction du temps et de composition du milieu nutritif.

PREMIER ESSAI.

Début de l'essai

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 3	10,2	9,6	+ 0,6	0,322	+ 5,8	0,104
5	9,7		+ 0,1		+ 1,03	
9	8,9		- 0,7		+ 7,8	
** 11	10,1	10,1	0	0,315	0	0,100
14	10,0		- 0,1		- 1	
16	10,2		+ 0,1		+ 0,98	
*** 20	10,4	10,2	+ 0,2	0,313	1,9	0,098
22	10,2		0		0	
27	10,0		- 0,2		+ 2	
**** 30	9,3	9,7	- 0,4	0,321	- 4,3	0,104
33	9,7		0		0	
36	10,1		+ 0,4		+ 3,96	

Après 3 jours

* 3	21,7	21,1	+ 0,6	0,218	+ 2,7	0,047
5	21,8		+ 0,7		+ 3,2	
9	19,9		- 1,2		- 6	
** 11	20,5	20,5	0	0,221	0	0,049
14	20		- 0,5		- 2,5	
16	21		+ 0,5		+ 2,38	
*** 20	23,0	21,4	+ 1,6	0,216	+ 6,9	0,047
22	21,8		+ 0,4		+ 1,8	
27	19,4		- 2		- 10,3	
**** 30	19,8	20,05	- 0,2	0,223	- 1	0,050
33	20,1		0		0	
36	20,3		+ 0,3		+ 1,4	

Légende :

- * : Plantes cultivées en solution nutritive complète renouvelée.
- ** : Plantes cultivées en solution nutritive de macro-éléments non renouvelée.
- *** : Plantes cultivées en solution nutritive complète non renouvelée.
- **** : Plantes cultivées en solution nutritive de macro-éléments renouvelée.

Après 4 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 3	22,2	24,4	- 2,2	0,199	- 9,5	0,040
5	25,8		+ 1,4		+ 5,2	
9	24,7		+ 0,3		+ 1,2	
** 11	22,9	22,3	+ 0,6	0,203	+ 2,4	0,041
14	22		- 0,3		- 1,2	
16	22		- 0,3		- 1,2	
*** 20	24,0	25,1	- 0,1	0,200	- 0,4	0,040
22	23,2		- 0,9		- 3,7	
27	25,1		+ 1		+ 3,8	
**** 30	22,7	21,7	0	0,205	0	0,042
33	22,4		- 0,3		- 1,28	
36	24,1		+ 0,4		+ 1,6	

Après 5 jours

* 3	26,0	25,8	+ 0,2	0,193	+ 0,74	0,037
5	26,0		+ 0,2		+ 0,74	
9	25,4		- 0,4		- 1,5	
** 11	23,1	23,1	0	0,200	0	0,040
14	24,0		+ 0,9		+ 3,4	
16	22,1		- 1		- 4,1	
*** 20	25,0	25,1	- 0,1	0,196	- 0,38	0,038
22	25,1		0		0	
27	25,2		+ 0,1		+ 0,38	
**** 30	23	24,7	+ 0,3	0,201	+ 1,2	0,040
33	22,7		0		0	
36	22,3		- 0,3		- 1,2	

Après 6 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 3	29,3	27,2	+ 2,1	0,192	+ 7,17	0,037
5	26,2		- 1,0		- 3,82	
9	26,2		- 1,0		- 3,82	
** 11	23,1	23,1	0	0,196	0	0,038
14	23,0		- 0,1		+ 0,38	
16	23,2		+ 0,1		+ 0,38	
*** 20	26,8	26,4	+ 0,4	0,191	+ 1,4	0,036
22	26,4		0		0	
27	25,9		- 0,5		- 1,9	
**** 30	22,3	22,7	- 0,4	0,197	- 1,6	0,039
33	22,6		- 0,1		- 0,39	
36	23,1		+ 0,4		+ 1,7	

Après 7 jours

* 3	27,5	28,0	- 0,5	0,187	- 1,8	0,035
5	28,1		+ 0,1		+ 0,35	
9	28,4		+ 0,4		+ 1,4	
** 11	24,3	23,9	+ 0,4	0,193	+ 1,5	0,037
14	23,5		- 0,4		- 1,5	
16	23,9		0		0	
*** 20	27,5	27,9	- 0,4	0,189	- 1,4	0,036
22	27,9		0		0	
27	28,3		+ 0,4		+ 1,4	
**** 30	22,6	23,2	- 0,6	0,195	- 2,3	0,038
33	23,8		+ 6,0		+ 2,2	
36	23,2		0		0	

Après 10 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 3	30	30,1	- 0,1	0,185	- 0,34	0,034
5	29,8		- 0,3		- 1,04	
9	30,5		+ 0,4		+ 1,4	
** 11	24,8	24,9	- 0,1	0,189	- 0,36	0,036
14	24,3		- 0,6		- 2,2	
16	25,6		+ 0,7		+ 2,4	
*** 20	29,8	29,5	+ 0,3	0,187	+ 1,04	0,035
22	29,5		0		0	
27	29,3		- 0,2		+ 0,7	
**** 30	24,1	24,7	- 0,6	0,194	- 2,3	0,037
33	24,7		0		0	
36	25,2		+ 0,5		+ 1,8	

Après 17 jours

* 3	32,7	32,8	- 0,2	0,183	- 0,67	0,034
5	32,9		+ 0,1		+ 0,33	
9	32,8		0		0	
** 11	26,1	26,1	0	0,192	0	0,037
14	25,8		- 0,3		- 1,1	
16	26,4		+ 0,3		+ 1,1	
*** 20	32,1	32,6	- 0,5	0,184	- 1,7	0,034
22	32,6		0		0	
27	33		+ 0,4		+ 1,3	
**** 30	26,9	27,3	- 0,4	1,54	- 1,47	2,37
33	26		- 1,3		- 4,76	
36	29		+ 1,7		+ 6,23	

Après 23 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 3	33,0	33,2	- 0,2	0,182	- 0,66	0,033
5	33,0		- 0,2		- 0,60	
9	33,6		+ 0,4		+ 1,3	
KK 11	27,4	27,4	0	0,188	0	0,035
14	27,8		+ 0,4		+ 1,4	
16	27		- 0,4		- 1,4	
KKK 20	32,9	32,5	+ 0,4	0,181	+ 1,29	0,033
22	31,5		- 1		- 0,33	
27	33,1		+ 0,6		+ 1,9	
KKKK 30	26,5	26,6	- 0,1	0,190	- 0,36	0,036
33	26,6		0		0	
36	26,8		+ 0,2		+ 0,71	

Après 4 semaines (fin de l'essai)

* 3	33,9	33,7	+ 0,2	0,180	+ 0,65	0,032
5	33,7		0		0	
9	33,6		- 0,1		- 0,33	
KK 11	27,8	27,8	0	0,186	0	0,035
14	28		+ 0,2		+ 0,69	
16	27,6		- 0,2		+ 0,70	
KKK 20	33,9	33,5	+ 0,4	0,181	+ 1,19	0,033
22	33,5		0		0	
27	33,0		- 0,5		- 1,49	
KKKK 30	27,5	27,4	+ 0,1	0,187	+ 0,35	0,035
33	26,8		- 0,6		- 2,2	
36	28		+ 0,6		+ 2,1	

TABLEAU 15 - Hauteur des plantes en fonction du temps et de la composition du milieu nutritif.

DEUXIEME ESSAI.

Début de l'essai

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 2	6,75	6,6	+ 0,15	0,390	+ 2,2	0,151
3	6,50		- 0,1		- 1,5	
4	6,5		- 0,1		- 1,5	
*** 14	6,75	7,0	- 0,35	0,369	- 5,18	0,136
17	7,35		+ 0,35		+ 4,76	
18	7,0		0		0	
**** 19	6,75	6,6	+ 0,15	0,390	+ 2,22	0,152
23	6,75		+ 0,15		+ 2,22	
24	6,25		- 0,35		- 5,60	
**** 30	6,25	6,8	+ 0,55	0,414	+ 8,8	0,171
32	7,25		- 0,45		- 6,20	
35	7		+ 0,20		+ 2,8	

Après 4 jours

* 2	20	19	+ 1	0,229	+ 5	0,0526
3	19		0		0	
4	18		- 1		- 5,55	
*** 14	17,7	18,2	- 0,5	0,234	- 2,8	0,0548
17	18,5		+ 0,3		+ 1,62	
18	18,5		+ 0,3		+ 1,62	
**** 19	19	19	0	0,230	0	0,0529
23	18,8		- 0,2		- 1,06	
24	18,9		- 0,1		- 1,06	
**** 30	17,7	18,1	- 0,4	0,235	- 2,25	0,055
32	18		- 0,1		- 0,55	
35	18,5		+ 0,5		+ 2,64	

Légende :

- * : Plantes cultivées en solution nutritive complète renouvelée.
- *** : Plantes cultivées en solution nutritive de macro-éléments non renouvelée.
- **** : Plantes cultivées en solution nutritive complète non renouvelée.
- ***** : Plantes cultivées en solution nutritive de macro-éléments renouvelée.

Après 6 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 2	24	24,3	- 0,3	0,207	- 1,30	0,0429
3	24,8		+ 0,5		+ 2,10	
4	24,1		- 0,2		- 8,66	
*** 14	20,5	20,5	0	0,221	0	0,0488
17	21,0		+ 0,5		+ 2,38	
18	20		- 0,5		- 2,5	
**** 19	24,7	23,9	+ 0,8	0,200	+ 3,1	0,0402
23	24		+ 0,1		+ 0,4	
24	23		- 0,9		- 3,75	
***** 30	21	21	0	0,218	0	0,0476
32	20		- 1		- 5	
35	22		+ 1		+ 4,54	

Après 10 jours

* 2	28	28,33	- 0,33	0,188	- 1,18	0,035
3	28		- 0,33		- 1,18	
4	29		+ 0,67		+ 2,31	
*** 14	22,2	23,6	- 1,4	0,206	- 6,31	0,0424
17	25		+ 1,4		+ 5,6	
18	23,6		0		0	
**** 19	27,7	28,5	- 0,8	0,187	- 2,89	0,035
23	30,1		+ 1,6		+ 5,32	
24	27,8		- 0,7		- 2,52	
***** 30	22,5	23,2	- 0,7	0,208	- 3,11	0,043
32	24		+ 0,8		+ 3,33	
35	23,1		- 0,1		- 0,43	

Après 17 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 2	32,2	32,9	- 0,7	0,174	- 2,17	0,030
3	32,5		- 0,4		- 1,23	
4	34		+ 1,1		+ 3,23	
** 14	25	26,2	- 1,2	0,195	- 4,8	0,038
17	27,5		+ 1,3		+ 4,73	
18	26		- 0,2		- 0,77	
*** 19	30,5	31,9	- 1,4	0,177	- 4,59	0,031
23	34		+ 2,1		+ 6,176	
24	31,2		- 0,7		- 2,24	
**** 30	25,3	26,1	- 0,8	0,196	- 3,16	0,038
32	27		+ 0,9		+ 3,33	
35	26		- 0,1		- 0,38	

Après 24 jours

* 2	34	34,5	- 0,5	0,170	- 1,47	0,029
3	34,5		0		0	
4	35		+ 0,5		+ 1,43	
** 14	26,8	27,8	- 1	0,192	- 3,85	0,037
17	28,8		+ 1		+ 3,57	
18	27,8		0		0	
*** 19	33,6	33,7	- 0,1	0,172	- 0,30	0,030
23	33,5		- 0,2		- 0,60	
24	33,9		+ 0,2		+ 0,60	
**** 30	27	27,8	- 0,8	0,190	- 2,96	0,036
32	26,7		- 1,1		- 4,12	
35	29,8		+ 2		+ 6,71	

Après 4 semaines (fin de l'essai)

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
* 2	32,8	34,7	- 1,3	0,171	- 3,96	0,029
3	35,5		+ 1,4		+ 3,94	
4	34		- 0,1		- 0,29	
* 14	28,4	28,1	+ 0,3	0,188	+ 1,06	0,035
17	30		+ 1,9		+ 6,33	
18	26		- 1,1		- 8,08	
* 19	32,85	34,2	- 1,35	0,168	- 3,99	0,028
23	34,5		+ 0,3		+ 0,845	
24	35,25		+ 1,5		+ 2,90	
* 30	29	27,8	+ 1,2	0,189	+ 4,14	0,036
32	27,5		- 0,3		- 1,09	
35	27		- 0,8		- 2,96	

Analyse sur l'ensemble des racines au début de l'essai.

Echantillon	Moyenne (cm) (M)	Ecart-type	Variance
* 1 à 9	6,65	0,388	0,150
** 10 à 18	6,79	0,384	0,147
*** 19 à 27	7,05	0,376	0,142
**** 28 à 36	7,12	0,375	0,141

Analyse sur l'ensemble des racines à la fin de l'essai.

* 1 à 9	13,42	0,273	0,074
** 10 à 18	9,81	0,319	0,102
*** 19 à 27	13,19	0,275	0,076
**** 28 à 36	9,87	0,318	0,101

TABLEAU 16 - Hauteur des plantes en fonction du temps et de la composition du milieu nutritif.

TROISIEME ESSAI.

Début de l'essai

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } S.N.C.	4,35	4,4	- 0,05	0,477	- 1,15	0,228
3 }	4,5		+ 0,10		+ 2,22	
5 }	4,1		- 0,30		- 7,32	
8 }	4,6		+ 0,20		+ 4,35	
10 } Zn x 5	3,95	4,13	- 0,18	0,492	- 4,56	0,242
13 }	3,95		- 0,18		- 4,56	
14 }	4,4		+ 0,27		+ 6,14	
15 }	4,2		+ 0,07		+ 1,67	
17 } Fe x 3	4,1	4,4	- 0,3	0,478	- 7,5	0,229
20 }	4,16		+ 0,2		+ 4,35	
21 }	4,8		+ 0,4		+ 8,33	
23 }	4,1		- 0,3		- 7,95	
25 } B x 5	4,75	4,6	+ 0,15	0,467	+ 3,16	0,218
26 }	4,25		- 0,35		- 8,24	
27 }	4,16		0		0	
32 }	4,75		+ 0,15		+ 3,16	
33 } Mn x 5	5,15	4,65	+ 0,50	0,464	+ 9,71	0,215
35 }	4,75		+ 0,15		+ 3,16	
36 }	4,35		- 0,30		- 6,90	
37 }	4,35		- 0,30		- 6,90	
43 } Cu x 5	4,75	4,6	+ 0,15	0,465	+ 3,16	0,216
44 }	4,70		+ 0,1		+ 2,13	
45 }	4,25		- 0,35		- 8,24	
48 }	4,80		+ 0,20		+ 4,17	

Légende :

- S.N.C. : Plantes cultivées sur solution nutritive complète.
- Zn x 5 : Plantes cultivées sur S.N.C. + concentration en zinc 5 fois plus forte.
- Fe x 3 : Plantes cultivées sur S.N.C. + concentration en fer 3 fois plus forte.
- B x 5 : Plantes cultivées sur S.N.C. + concentration en bore 5 fois plus forte.
- Mn x 5 : Plantes cultivées sur S.N.C. + concentration en manganèse 5 fois plus forte.
- Cu x 5 : Plantes cultivées sur S.N.C. + concentration en cuivre 5 fois plus forte.

Après 3 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } S.N.C.	16,8	16,8	0	0,244	0	0,060
3 } S.N.C.	15,2		- 1,6		- 10,53	
5 } S.N.C.	16,8		0		0	
8 } S.N.C.	18,3		+ 1,5		+ 8,20	
10 } Zn x 5	15,9	15,3	+ 0,60	0,256	+ 3,77	0,066
13 } Zn x 5	16		+ 0,70		+ 4,37	
14 } Zn x 5	14,5		- 0,80		- 5,52	
15 } Zn x 5	14,6		- 0,70		- 4,79	
17 } Fe x 3	15	14,9	+ 0,1	0,259	+ 0,67	0,067
20 } Fe x 3	15		+ 0,1		+ 0,67	
21 } Fe x 3	14,7		- 0,2		- 1,36	
23 } Fe x 3	14,7		- 0,2		- 1,36	
25 } B x 5	16	15,9	+ 0,1	0,251	+ 0,625	0,063
26 } B x 5	16		+ 0,1		+ 0,625	
27 } B x 5	15,5		- 0,4		- 2,58	
32 } B x 5	16		+ 0,1		+ 0,625	
33 } Mn x 5	14	14,4	- 0,4	0,264	- 2,86	0,070
35 } Mn x 5	15,8		+ 1,4		+ 8,86	
36 } Mn x 5	13,6		- 0,8		- 5,88	
37 } Mn x 5	14		- 0,4		- 2,86	
43 } Cu x 5	15,6	15,6	0	0,253	0	0,064
44 } Cu x 5	16,4		+ 0,8		+ 4,88	
45 } Cu x 5	14,8		- 0,8		- 5,41	
48 } Cu x 5	15,6		0		0	

Après 10 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } 3 } 5 } S.N.C. 8 }	31,4 33 33 33	32,6	- 1,2 + 0,4 + 0,4 + 0,4	0,175	- 3,82 + 1,21 + 1,21 + 1,21	0,031
10 } 13 } 14 } Zn x 5 15 }	30 30 31 29	30	0 0 + 1 - 1	0,183	0 0 + 3,23 - 3,45	0,033
17 } 20 } 21 } Fe x 3 23 }	25 28 24 27	26	- 1 + 2 - 2 + 1	0,196	- 4 + 7,14 - 8,33 + 3,7	0,038
25 } 26 } 27 } B x 5 32 }	30 32 30 32	31	- 1 + 1 - 1 + 1	0,180	- 3,23 + 3,23 - 3,23 + 3,23	0,032
33 } 35 } 36 } Mn x 5 37 }	26 25 24 26,5	25,4	+ 0,6 - 0,4 - 1,4 + 1,5	0,196	+ 2,31 - 1,6 - 5,83 + 5,66	0,039
43 } 44 } 45 } Cu x 5 48 }	28,6 29 28,3 29,7	28,9	- 0,3 + 0,1 - 0,6 + 0,8	0,186	- 1,04 + 0,35 - 2,08 + 2,77	0,035

Après 15 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } 3 } 5 } S.N.C. 8 }	34,5 34,8 36,6 35,7	35,4	- 0,9 - 0,6 + 1,2 + 0,3	0,168	- 2,61 - 1,72 + 3,28 + 0,84	0,028
10 } 13 } Zn x 5 14 } 15 }	33 34 34 32	33,25	- 0,25 + 0,75 + 0,75 - 1,25	0,173	- 0,76 + 2,21 + 2,21 - 3,91	0,030
17 } 20 } Fe x 3 21 } 23 }	28,9 28,9 29,7 30,2	29,4	- 0,5 - 0,5 + 0,3 + 0,8	0,184	- 1,73 - 1,73 + 1,01 + 2,65	0,034
25 } 26 } B x 5 27 } 32 }	34 33,1 34 34,5	33,9	+ 0,1 - 0,8 + 0,1 + 0,6	0,172	+ 0,294 - 2,42 + 0,29 + 1,74	0,029
33 } 35 } Mn x 5 36 } 37 }	30 28,3 28,5 28,5	28,8	+ 1,2 - 0,5 - 0,3 - 0,3	0,186	+ 4 - 1,77 - 1,05 - 1,05	0,035
43 } 44 } Cu x 5 45 } 48 }	33 32 31,4 31,3	32	+ 1 0 - 0,6 - 0,7	0,177	+ 3,03 0 - 1,91 - 2,24	0,031

Après 21 jours

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } 3 } 5 } S.N.C. 8 }	36,5 35 36,5 36,7	36,2	+ 0,3 - 1,2 + 0,3 + 0,5	0,166	+ 0,82 - 3,43 + 0,82 + 1,36	0,028
10 } 13 } Zn x 5 14 } 15 }	34,8 36 36 34,8	35,4	- 0,6 + 0,6 + 0,6 - 0,6	0,168	- 1,72 + 1,60 + 1,60 - 1,72	0,028
17 } 20 } Fe x 3 21 } 23 }	33 32 32,5 32,2	32,4	+ 0,6 - 0,4 + 0,1 - 0,2	0,175	+ 1,82 - 1,25 + 0,31 - 0,62	0,031
25 } 26 } B x 5 27 } 32 }	37 35,6 36,5 35	36	+ 1 - 0,4 + 0,5 - 1	0,167	+ 2,70 - 1,12 + 1,37 - 2,86	0,028
33 } 35 } Mn x 5 36 } 37 }	31,3 32,2 30,4 31	31,2	+ 0,1 + 1 - 0,8 - 0,2	0,179	+ 0,32 + 3,11 - 2,63 - 0,65	0,032
43 } 44 } Cu x 5 45 } 48 }	35 35,8 34 34	34,7	+ 0,3 + 1,1 - 0,7 - 0,7	0,170	+ 0,86 + 3,07 - 2,06 - 2,06	0,029

Après 4 semaines (fin de l'essai)

Echantillon	Hauteur (cm)	Moyenne (M)	Ecart par rapport à la moyenne	Ecart Type	Ecart de la moyenne (en %)	Variance
1 } 3 } 5 } S.N.C. 8 }	40	39,75	+ 0,25	0,159	+ 0,63	0,025
	39		- 0,75		- 1,92	
	40		+ 0,25		+ 0,63	
	40		+ 0,25		+ 0,63	
10 } 13 } Zn x 5 14 } 15 }	37,5	38,5	- 1	0,161	- 2,67	0,026
	39		+ 0,5		+ 1,28	
	39		+ 0,5		+ 1,28	
	38,5		0		0	
17 } 20 } Fe x 3 21 } 23 }	34,2	34,1	+ 0,1	0,171	+ 0,29	0,029
	33,5		- 0,6		- 1,79	
	34		- 0,1		- 0,29	
	34,7		+ 0,6		+ 1,73	
25 } 26 } B x 5 27 } 32 }	39,3	39	+ 0,3	0,160	+ 0,76	0,026
	39,3		+ 0,3		+ 0,76	
	38,7		- 0,3		- 0,78	
	39		0		0	
33 } 35 } Mn x 5 36 } 37 }	32,2	33,05	+ 0,15	0,174	+ 0,45	0,030
	35		+ 1,95		+ 5,57	
	32		- 1,05		- 3,28	
	32		- 1,05		- 3,28	
43 } 44 } Cu x 5 45 } 48 }	37,6	37	+ 0,6	0,164	+ 1,60	0,027
	36,4		- 0,6		- 1,60	
	37		0		0	
	37		0		0	

*Analyse sur l'ensemble des parties aériennes
au début de l'essai.*

Echantillon	Moyenne (cm) (\bar{M})	Ecart-type	Variance
S.N.C. 1 à 8	4,12	0,493	0,243
Zn x 5 9 à 16	4,21	0,488	0,238
Fe x 3 17 à 24	4,44	0,474	0,225
B x 5 25 à 32	4,5	0,461	0,222
Mn x 5 33 à 40	4,54	0,469	0,220
Cu x 5 41 à 48	4,42	0,476	0,226

*Analyse sur l'ensemble des parties aériennes
à la fin de l'essai.*

S.N.C. 1 à 8	39,87	0,025	0,158
Zn x 5 9 à 16	38,5	0,026	0,161
Fe x 3 17 à 24	34,1	0,029	0,171
B x 5 25 à 32	39,10	0,026	0,160
Mn x 5 33 à 40	33,06	0,030	0,174
Cu x 5 41 à 48	37,50	0,028	0,163

*Analyse sur l'ensemble des racines
au début de l'essai.*

Echantillon	Moyenne (cm) (\bar{M})	Ecart-type	Variance
S.N.C. 1 à 8	4,37	0,478	0,229
Zn x 5 9 à 16	4,30	0,482	0,232
Fe x 3 17 à 24	4,60	0,466	0,217
B x 5 25 à 32	4,63	0,465	0,216
Mn x 5 33 à 40	4,78	0,457	0,209
Cu x 5 41 à 48	4,85	0,453	0,206

*Analyse sur l'ensemble des racines
à la fin de l'essai.*

S.N.C. 1 à 8	11,29	1,82	3,312
Zn x 5 9 à 16	11,65	1,01	1,02
Fe x 3 17 à 24	9,85	0,967	0,94
B x 5 25 à 32	9,25	0,835	0,70
Mn x 5 33 à 40	11,64	1,311	1,72
Cu x 5 41 à 48	10,41	0,718	0,52

que fois pour chaque traitement et pour chaque essai. Ces hauteurs sont données dans les tableaux 14, 15 et 16. Nous pouvons déduire de ces tableaux et des figures 4, 5 et 6, que les plantes ont une croissance maximale pendant la première semaine des essais et qu'ensuite leur croissance et leur développement continuent mais beaucoup plus lentement. Ces figures montrent aussi que les plantes cultivées en milieu nutritif contenant des oligo-éléments atteignent une hauteur plus grande que celles cultivées en milieu sans oligo-éléments ; ainsi, la figure 4 montre bien la différence des hauteurs en fonction de la composition du milieu nutritif et nous voyons que le milieu le plus convenable est celui de solution nutritive complète (S.N.C.).

3. POIDS DE MATIERE SECHE PRODUIT EN FIN D'ESSAI.

A la fin de chaque essai, les plantes ont été séchées (voir préparation des échantillons) puis pesées, d'abord dans leur totalité et après avoir été divisées en quatre parties (feuilles, gaines, racines, graines) ; nous avons pesé chacune de ces quatre parties pour étudier l'influence de chaque milieu nutritif sur la production de matière végétale sèche en comparant leur poids à ceux obtenus en milieu nutritif normal (S.N.C.).

Nous donnons, ici, les poids dans les deux cas suivants.

3.1. Cas de déficience en oligo-éléments.

Ce cas concerne les deux premiers essais dans lesquels nous avons deux traitements : le premier avec la solution nutritive des éléments majeurs donc déficience en oligo-éléments, et le deuxième ayant tous les éléments minéraux nécessaires d'après Hoagland et ARNON donc pas de déficience en oligo-éléments.

Les résultats sont donnés dans le tableau 17. Ce tableau nous montre qu'en cas de déficience en oligo-éléments (cas de S.N.M.), la production de matière sèche a baissé d'un pourcentage important (8,41 %) par rapport

TABLEAU 17 - Poids de matière sèche en mg par traitement
Premier essai.

Traitement	S.N.M. *		S.N.C. **	
	Première répétition	Deuxième répétition	Première répétition	Deuxième répétition
Feuilles	204	210	215	233
Gaines	87	80	99	90
Racines	164	161	175	171
Graines	83	81	89	88
Poids total	538	532	578	582
Moyenne $\frac{1 + 2}{2}$	535		580	
% ***	- 8,41			

* Solution nutritive qui comporte les macro-éléments et le fer.

** Solution nutritive qui comporte les macro-éléments et les oligo-éléments (complète).

*** % Différence en pourcentage entre les deux traitements.

au milieu non déficient en oligo-éléments et que la différence se manifeste davantage sur le poids des feuilles que sur celui des autres organes des plantes (baisse de 10,34 %).

Le tableau 18 concerne le deuxième essai et confirme ce que nous avons trouvé dans le premier essai fait dans les mêmes conditions d'alimentation et d'environnement donc, l'influence des oligo-éléments est importante sur la production de la matière végétale.

Nous pouvons affirmer que la différence entre les deux essais est significative (8,41 et 8,66 % successivement).

TABLEAU 18 - Poids de matière sèche en mg par traitement
Deuxième essai.

Traitement	S.N.M. *		S.N.C. **	
	Première répétition	Deuxième répétition	Première répétition	Deuxième répétition
Feuilles	263	241	282	300
Gaines	104	103	111	82
Racines	103	113	134	124
Graines	89	91	90	89
Poids total	559	548	617	595
Moyenne $\frac{1 + 2}{2}$ % ***	553,5		606	
	- 8,66			

* Solution nutritive qui comporte les macro-éléments et le fer.

** Solution nutritive qui comporte les macro-éléments et les oligo-éléments (complète).

*** Différence en pourcentage entre les deux traitements.

Comme dans le premier essai, la différence de poids pour les feuilles est plus importante que pour les autres parties des plantes.

3.2. Cas d'excès en oligo-éléments.

Dans le tableau 19 nous donnons le poids de la matière sèche de chaque traitement du troisième essai et la différence en pourcentage par rapport au traitement en S.N.C., entre les différents traitements de cet essai.

TABLEAU 19 - Poids de matière sèche en mg par traitement
Troisième essai.

Milieu nutritif Organe de la plante	S.N.C.	S.N.C. + B x 5	S.N.C. + Zn x 5	S.N.C. + Cu x 5	S.N.C. + Fe x 3	S.N.C. + Mn x 5
Première feuille *	33	33	39	39	32	32
Feuilles	337	324	325	287	301	317
Racines	95	97	97	115	99	95
Graines	68	72	55	68	70	73
Poids total	533	526	516	509	502	515
% **	-	- 1,33	- 3,8	- 4,50	- 5,82	- 3,50

* Nous avons mis la première feuille à part car nous considérons qu'elle a une composition chimique différente des autres feuilles plus jeunes (BROWN et al., 1977).

** Différence en pourcentage de production de matière sèche en fonction du milieu nutritif.

Ce tableau nous montre que la production de la matière végétale est maximale dans le milieu nutritif complet (S.N.C.) ; cependant, il n'y a pas de différence significative entre ce milieu et le milieu en solution nutritive complète ayant une concentration en bore cinq fois plus forte (S.N.C. + B x 5). La baisse la plus grande de la production de matière sèche est observée dans la solution nutritive complète ayant une concentration en fer trois fois plus forte (5,82 %).

En comparant les trois tableaux qui représentent les trois essais, nous pouvons estimer que l'absence des oligo-éléments a une influence plus grande que leur excès, dans notre cas, sur la quantité produite de matière sèche.

4. ANALYSE DES SOLUTIONS NUTRITIVES AU COURS DES ESSAIS.

Les éléments nutritifs composant les solutions nutritives ont été dosés au cours des essais pour connaître les quantités absorbées de chaque élément et, par conséquent, l'assimilabilité de ces éléments par les plantes en fonction du temps, en d'autres termes, pour savoir à quelle période de leur croissance les plantes ont davantage besoin des éléments et de quel élément parmi tous ceux qui leur sont nécessaires. De tels dosages périodiques n'ont guère été faits jusqu'à maintenant, ils ont été effectués sur les éléments majeurs et les oligo-éléments pour les deux premiers essais.

4.1. Dosage des éléments majeurs.

Nous avons fait le dosage sur les solutions auxquelles les oligo-éléments ont été ajoutés, ou non, pour voir s'il y a une influence de ceux-ci sur l'absorption des éléments majeurs. Nous voulions savoir, également, à quel stade de son développement la plante absorbe le plus de chacun des éléments car cela nous aide à étudier les problèmes de nutrition par rapport à la concentration du milieu. Dans ce but, nous avons rassemblé dans des tableaux les quantités absorbées de chaque élément à la fin de la semaine pour les solutions renouvelées toutes les semaines et, à la fin de l'essai pour les solutions non renouvelées.

Les éléments majeurs dosés sont le potassium, le calcium, le magnésium et le phosphore.

Le tableau 20 montre les résultats du premier essai. Chaque chiffre est la moyenne des neuf répétitions qui correspondent à un traitement ; ces moyennes nous montrent les résultats obtenus les plus importants.

1°) Tous les éléments majeurs dosés sont absorbés en plus grande quantité durant la première semaine de l'essai ; cette absorption correspond à la croissance maximale des plantes pendant la même période. Les courbes de croissance et d'absorption l'indiquent bien clairement (figures 7, 8 et 9).

2°) Le calcul statistique des moyennes de chaque traitement donne en

TABLEAU 20 - Moyennes des quantités absorbées en $\mu\text{g/ml}$ par semaine pour les solutions nutritives du premier essai.

Temps	Ca^{++}		K^+		Mg^{++}		PO_4^{---}	
	S.N.C. (1)	S.N.M. (2)	S.N.C.	S.N.M.	S.N.C.	S.N.M.	S.N.C.	S.N.M.
Première semaine	11,18	15,63	58,64	56,41	7,12	13,38	31,78	26,78
Deuxième semaine	7,13	10,60	38,58	35,42	5,55	6,90	18,67	14,56
Troisième semaine	12,55	12,78	35,6	34,27	5,21	5,77	15	13,33
Quatrième semaine	10,27	12,41	34,42	33,83	6,06	7,35	14,56	12,45
Solutions non renouvelées	39,66	45,27	138,25	123,96	23,68	21,76	70,11	63,33

(1) S.N.C. : Solution nutritive complète.

(2) S.N.M. : Solution nutritive de macro-éléments.

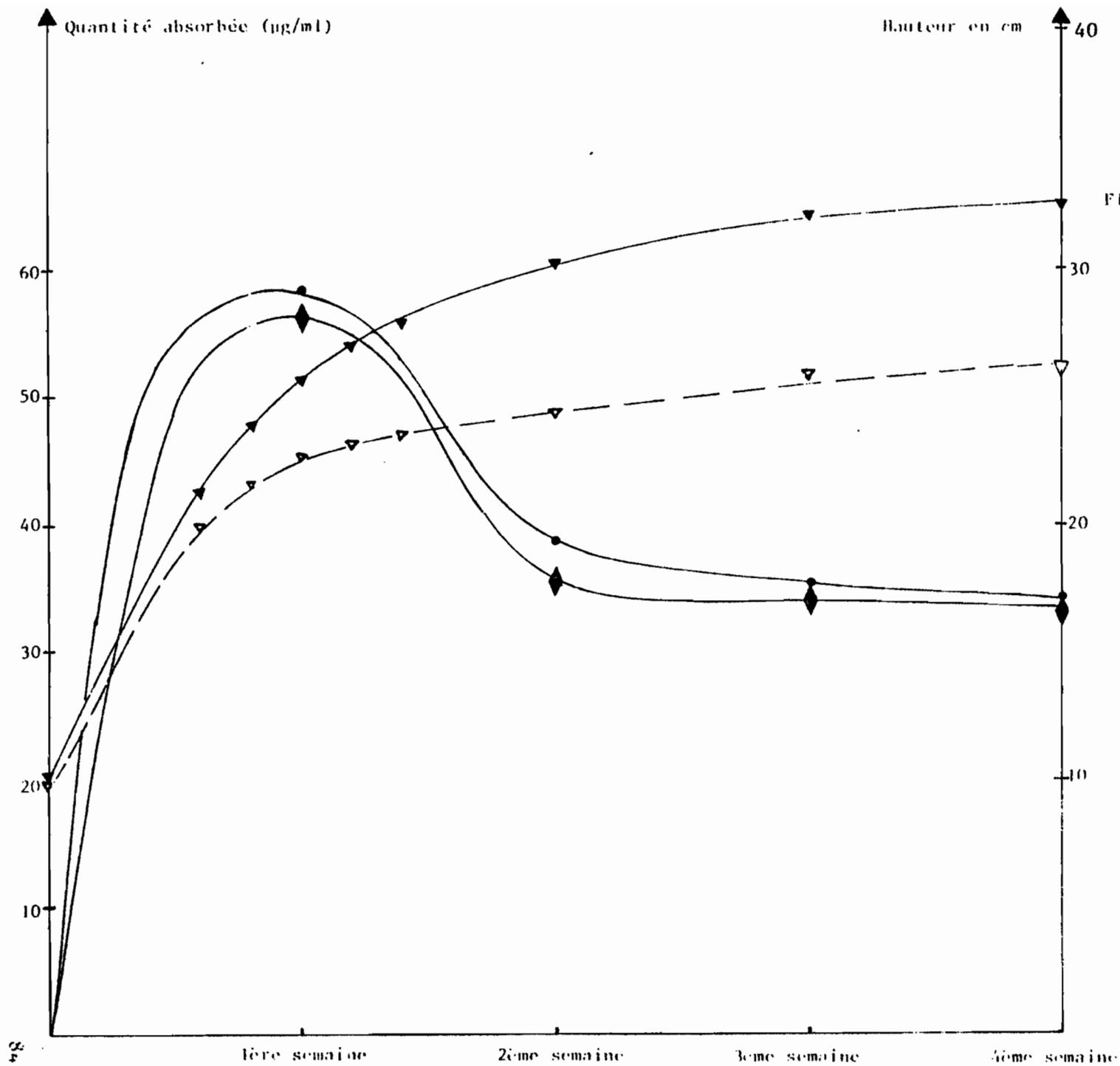


FIGURE 7 - Croissance des plantes en fonction de l'absorption du potassium et du temps. "PREMIER ESSAI".

- Absorption du K dans la S.N.C.
- ◆ Absorption du K dans la S.N.M.
- ▼ Plantes cultivées en S.N.C. renouvelée
- ▽ Plantes cultivées en S.N.M. renouvelée

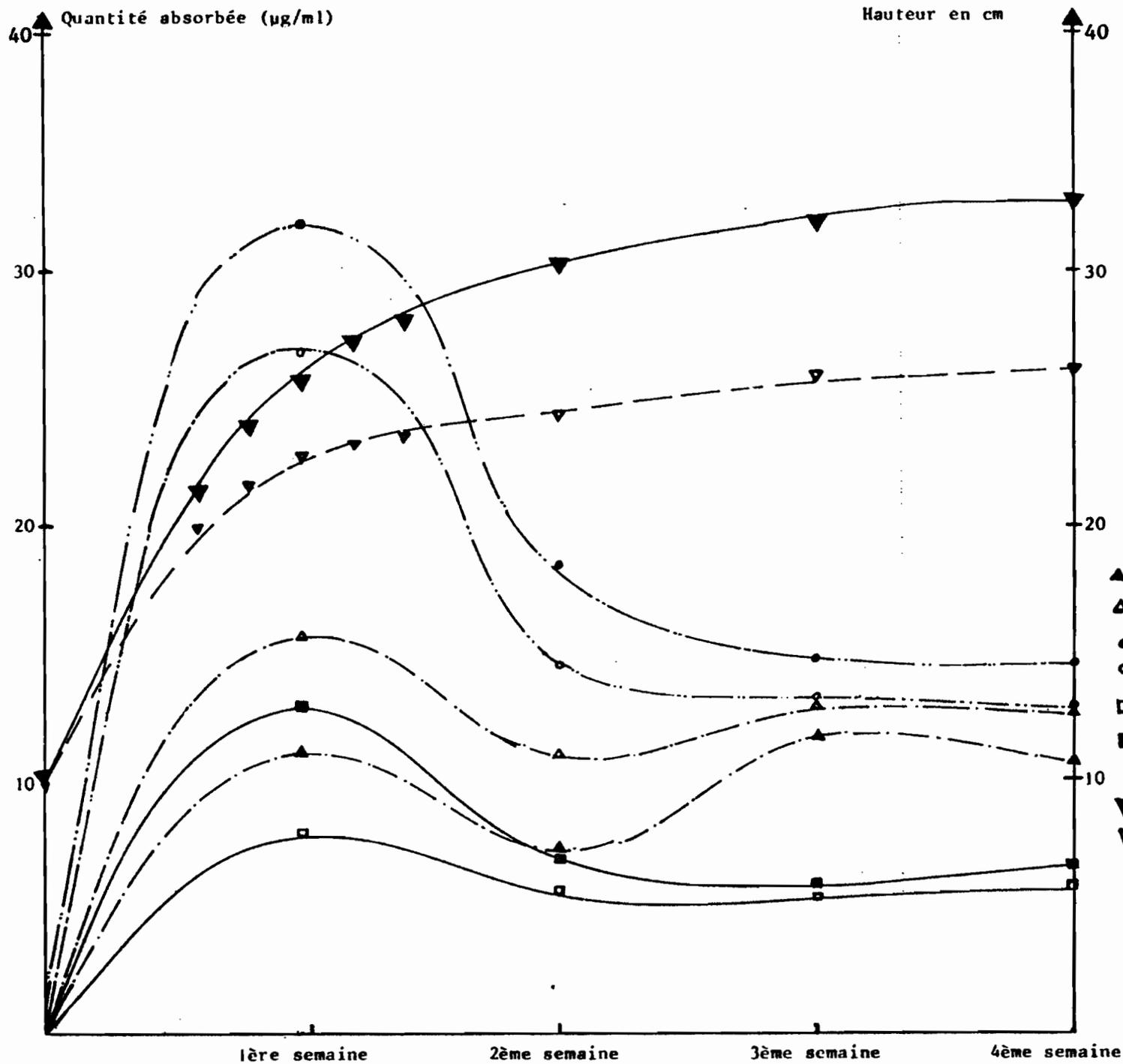


FIGURE 8 - Croissance des plantes en fonction de l'absorption de certains éléments majeurs (Ca, P, Mg) et du temps. "PREMIER ESSAI".

même temps le coefficient de variation des répétitions de chaque traitement ; il montre que la différence n'est pas significative.

3°) En ce qui concerne l'absorption de chaque élément pris séparément, nous pouvons dire, d'après les résultats des dosages concrétisés dans les tableaux 20 et 21 et les figures 7 et 8, que :

- le potassium est un élément que le blé absorbe en grande quantité à tous les moments de nos essais. Aussi, au cours de l'essai, nous avons ajouté à la solution nutritive non renouvelée une quantité égale à celle que nous avons mise au début. La figure 7, tracée à partir de la moyenne des quantités absorbées chaque semaine, nous montre l'absorption du potassium en fonction du temps et des différentes solutions nutritives. Nous pouvons en déduire que le potassium est relativement mieux absorbé quand nous ajoutons les oligo-éléments ; la différence est de 5,34 %. Les coefficients de corrélation entre cet élément et les oligo-éléments seront donnés plus tard ainsi que ceux des autres éléments majeurs (partie 8 du chapitre II). La croissance des plantes est en corrélation avec l'absorption du potassium ; elle est maximale la première semaine ce qui peut être mis en parallèle avec l'absorption du potassium ;

- le calcium, contrairement au potassium, est mieux absorbé quand les oligo-éléments ne sont pas ajoutés aux solutions nutritives ; c'est ce qui ressort du tableau 20, sur les moyennes d'absorption pendant toute la durée de l'essai. Dans le cas de la solution nutritive de macro-éléments seuls, le calcium est absorbé en plus grande quantité que dans le cas de la solution nutritive complète. La différence est de 22,12 %.
La figure 7 d'absorption et les moyennes des quantités absorbées nous montrent que l'absorption de cet élément ne se fait pas de la même manière que celles des autres éléments ;

- le magnésium, comme le calcium, est plus absorbé dans le cas de la solution nutritive des macro-éléments. La différence est significative ; elle atteint 22,40 %. De même, la figure 8 de son absorption et la courbe de croissance des plantes montrent que cette croissance est corrélée avec l'absorption du magnésium, c'est-à-dire que la croissance

TABLEAU 21 - Calcul statistique des résultats de l'analyse des solutions nutritives du premier essai.

Analyse faite à la fin de l'essai.

	Solution nutritive complète (S.N.C.) (µg/ml).								
	Ca	Mg	PO ₄	K	Mn	Zn	B	Fe	Cu
N	9	9	9	9	9	9	9	9	9
\bar{x}	43,722	21,722	119,333	16,489	0,1996	0,0199	0,212	0,664	0,0079
S	2,265	1,693	3,775	1,328	0,0095	0,0009	0,017	0,0394	0,0009
CV %	5,181	7,794	3,163	8,025	4,7745	4,3890	8,086	6,021	10,879

	Solution nutritive de macro-éléments (S.N.M.) (µg/ml)			
	Ca	Mg	PO ₄	K
N	9	9	9	9
\bar{x}	38,111	26,639	126,667	29,33
S	1,409	1,257	4,123	2,919
CV %	3,698	4,718	3,255	9,951

Légende.

- N : Nombre de données (dans notre cas, N représente le nombre de répétitions de chaque traitement).
 \bar{x} : Moyenne.
S : Ecart-type.
CV % : Coefficient de variation.

suit l'absorption ; cependant, les plantes n'atteignent leurs longueurs maximales que lorsqu'elles sont cultivées en solution nutritive complète dans laquelle les oligo-éléments sont ajoutés en quantités suffisantes ;

- le phosphore est dosé sous forme de P_2O_5 et les résultats sont donnés en phosphate PO_4^{---} . Ces résultats, rassemblés dans le tableau 20 et représentés par la figure 8, montrent que l'absorption du phosphore est favorisée par l'addition des oligo-éléments au milieu nutritif (cas de S.N.C.). La différence entre son absorption en solution nutritive de macro-éléments et en solution complète est significative ; elle est, en moyenne, de 18,35 %. Cette absorption, comme l'indique la figure est maximale au début puis elle diminue et, vers la fin, elle semble se stabiliser ; ceci correspond à la croissance des plantes. L'absorption du phosphore en plus grande quantité, dans le cas où les oligo-éléments sont ajoutés en quantité suffisante (cas de S.N.C.), se traduit par une croissance optimale des plantes. En effet, c'est dans ce cas que les plantes atteignent la plus grande hauteur. Le coefficient de variation entre les quantités de phosphore absorbées dans les répétitions du même traitement est faible comme le montre le tableau 21 : 3,255 pour la solution nutritive de macro-éléments (S.N.M.) et 3,163 pour la solution nutritive complète (S.N.C.).

Le deuxième essai donne des résultats semblables à ceux du premier, ce qui revient à dire que ce deuxième essai, fait dans les mêmes conditions que le premier pour en vérifier les résultats, les a confirmés.

4.2. Dosage des oligo-éléments.

Les oligo-éléments sont dosés systématiquement dans tous les essais afin de connaître la quantité absorbée de chacun d'entre-eux, en fonction du temps et de la croissance des plantes. Nous donnons, ici, les résultats élément par élément.

4.2.1. Le cuivre.

La figure 9 et le tableau 22 montrent que le cuivre est assimilé par le blé d'une façon progressive et parallèle à la croissance des plants de blé. Son absorption a tendance à se stabiliser à partir de la troisième semaine, ce qui correspond à la croissance des plantes.

Le calcul statistique du tableau 23 montre une variabilité satisfaisante sur les répétitions de chaque traitement, le coefficient de variation ne dépassant pas 10 %.

4.2.2. Le zinc.

C'est un élément pour lequel il existe de nombreuses sources de pollution ; aussi, malgré toutes les précautions que nous avons prises, nous ne pouvons affirmer que les solutions nutritives dans lesquelles nous n'avons pas ajouté de zinc soient totalement exemptes de cet élément.

L'absorption du zinc, donnée par la figure 9 et le tableau 22, est maximale pendant la première semaine de l'essai ; à la fin de la deuxième semaine, elle baisse beaucoup et, dès lors, la quantité de zinc absorbée est presque toujours la même jusqu'à la fin de l'essai, comme le montrent les chiffres du tableau 23 (calcul statistique des moyennes et des coefficients de variation). Par ailleurs, les résultats du deuxième essai le confirment.

4.2.3. La manganèse.

Cet élément est, comme on le voit à partir de la figure 10, semblable au cuivre. Son absorption est parallèle à la croissance des plantes. Nous voyons, d'après le tableau 22, que cet élément est plus absorbé que le cuivre et le zinc ; d'après le même tableau, nous pouvons conclure que son absorption ne varie pas beaucoup d'une semaine à l'autre. Du tableau 23 nous déduisons que les différences entre répétitions sont faibles. Le deuxième essai donne les mêmes résultats.

TABLEAU 22 - Moyennes des quantités absorbées, par semaine, de chaque oligo-élément ajouté aux solutions nutritives complètes du premier essai, en µg/ml.

Temps Elements	Première semaine	Deuxième semaine	Troisième semaine	Quatrième semaine
Cu	0,002	0,0031	0,0037	0,0030
Mn	0,140	0,158	0,1653	0,0907
Zn	0,0265	0,0074	0,0073	0,0075
B	0,158	0,126	0,134	0,130
Fe { 1	0,113	0,819	0,733	0,747
Fe { 2	0,104	0,8067	0,73	0,70

1 : Fer dans la solution nutritive complète.

2 : Fer dans la solution nutritive de macro-éléments.

TABLEAU 23 - Etude statistique des résultats du dosage des oligo-éléments dans les solutions nutritives complètes (S.N.C.) renouvelées.
Premier Essai.

CUIVRE				
	Première semaine	Deuxième semaine	Troisième semaine	Quatrième semaine
N	9	9	9	9
\bar{x}	0,0190	0,0179	0,0173	0,0179
s	0,0011	0,0009	0,0012	0,0007
CV %	5,99	5,09	6,80	4,12
MANGANESE				
N	9	9	9	9
\bar{x}	0,360	0,342	0,3347	0,4093
s	0,0312	0,0324	0,0302	0,0336
CV %	8,68	9,49	9,02	8,21
ZINC				
N	9	9	9	9
\bar{x}	0,0247	0,0404	0,0417	0,043
s	0,0020	0,0026	0,0054	0,0015
CV %	8,29	6,38	8,24	5,25

TABLEAU 23 - Suite.

BORE				
	Première semaine	Deuxième semaine	Troisième semaine	Quatrième semaine
N				
\bar{x}	0,3544	0,3856	0,3291	0,4148
s	0,0194	0,0181	0,0231	0,0244
CV %	5,48	4,70	7,02	5,88
FER (1)				
N				
\bar{x}	1,412	0,7011	0,7867	0,773
s	0,0424	0,0448	0,0480	0,0456
CV %	3,99	6,40	6,10	5,89
FER (2)				
N	9	9	9	9
\bar{x}	1,4022	0,704	0,7822	0,920
s	0,0533	0,040	0,0507	0,0823
CV %	4,80	5,68	6,48	8,94

Légende :

N : Nombre de données.

 \bar{x} : Moyenne.

s : Ecart-type.

CV % : Coefficient de variation en pourcentage.

(1) : Fer en S.N.C.

(2) : Fer en S.N.M.

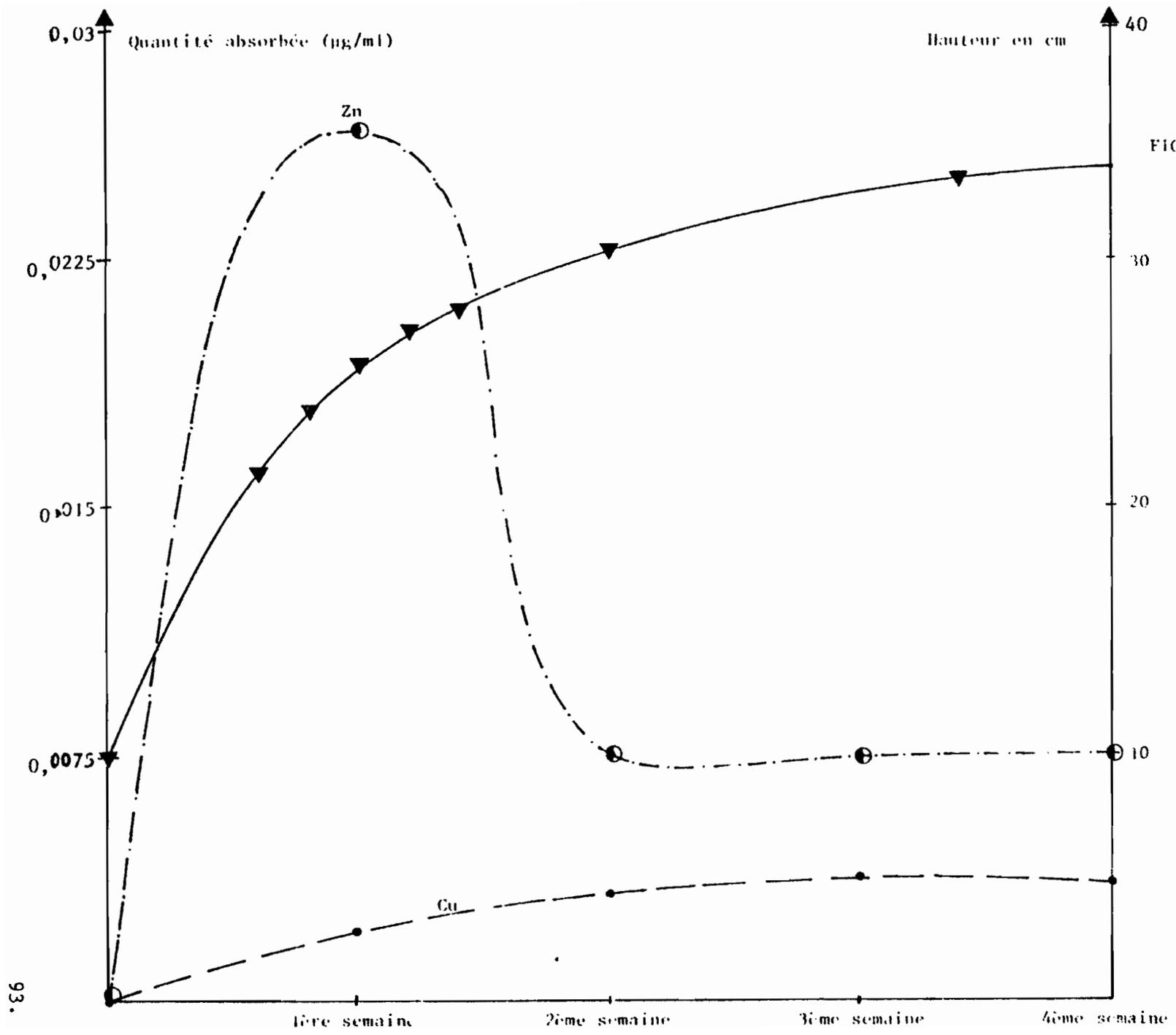


FIGURE 9 - Croissance des plantes du premier essai en fonction de l'absorption du cuivre et du zinc.

- ▼ Hauteur des plantes.
- Absorption du cuivre.
- Absorption du zinc.

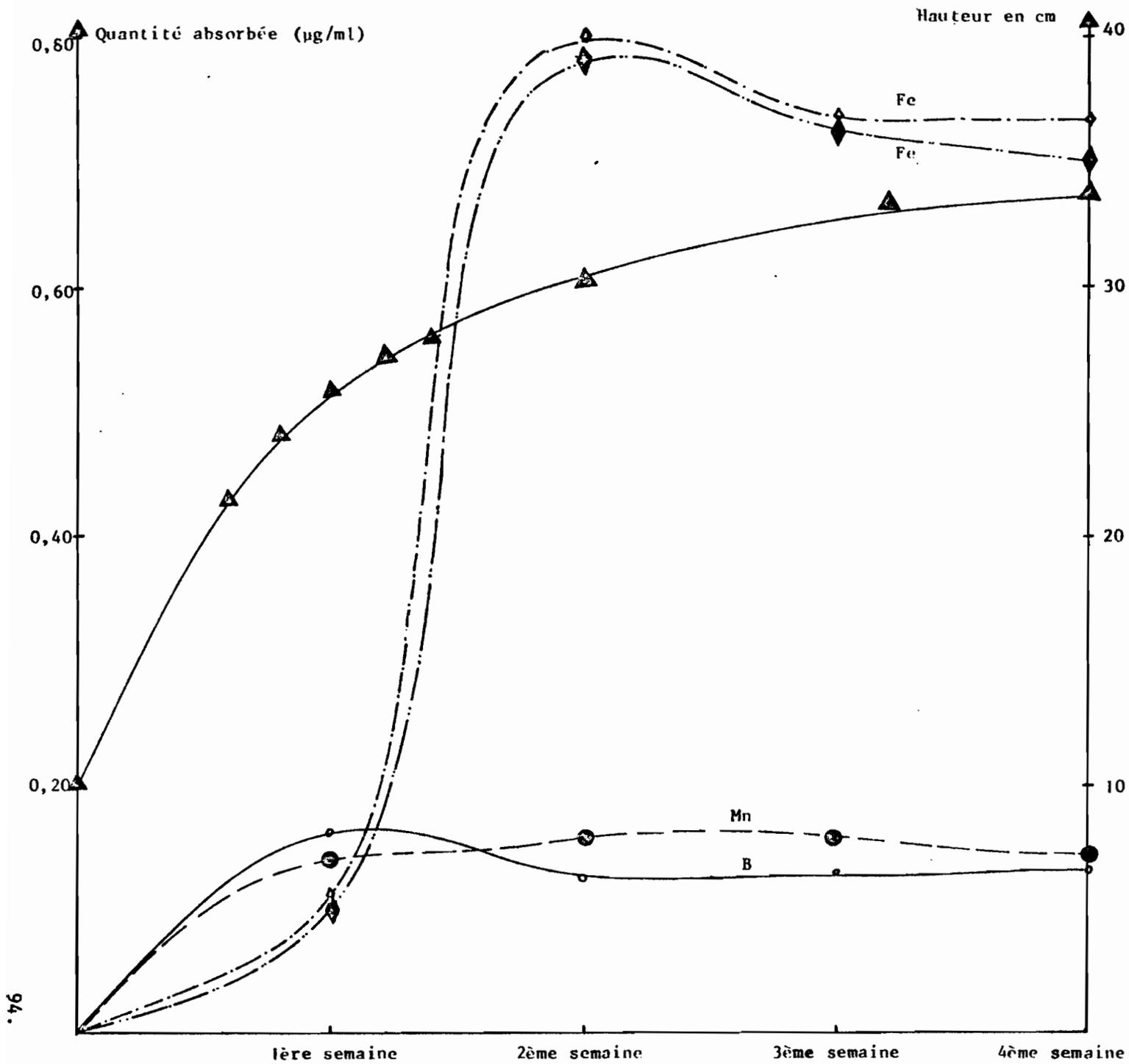


FIGURE 10 - Croissance des plantes du premier essai en fonction de l'absorption du bore, du manganèse et du fer.

- ▲ Hauteur des plantes.
- Absorption du bore.
- Absorption du manganèse.
- ◇ Absorption du fer dans la solution nutritive complète.
- ◆ Absorption du fer dans la solution de macro-éléments.

4.2.4. Le fer.

D'après la figure 10 et le tableau 22 cet élément, ajouté dans toutes les solutions, est absorbé en quantité plus grande pendant la première semaine de l'essai. L'absorption maximale correspond à la croissance maximale puis elle diminue quand cette figure de croissance s'aplatit enfin, elle tend vers un palier.

Nous voyons, d'autre part, sur ces mêmes figure et tableau que le dosage du fer, dans les deux traitements, ne présente pas une grande différence ; par conséquent, le fer est absorbé de la même façon quand les oligo-éléments sont ajoutés ou non au milieu.

Nous pouvons déduire du tableau 23 que les taux de fer, dans chacune des répétitions, sont très proches les uns des autres pour un même traitement.

4.2.5. Le bore.

D'après les résultats rassemblés dans le tableau 22 et la figure 9, le bore est absorbé en plus grande quantité pendant la première semaine de l'essai, tandis que pendant la deuxième semaine l'absorption diminue et qu'ensuite elle reste pratiquement constante jusqu'à la fin de l'essai, ce qui correspond à la courbe de croissance des plantes.

Il ressort du tableau 23 que le bore, ainsi que les autres éléments, ne sont pas totalement absorbés. Ce même tableau montre que l'écart-type et le coefficient de variation du dosage du bore sont très acceptables.

Le deuxième essai, fait dans les mêmes conditions que le premier, en confirme les résultats.

4.2.6. Influence d'un excès des oligo-éléments (troisième essai).

Le troisième essai, dans lequel les concentrations des oligo-éléments dans les solutions nutritives sont différentes, montre que l'absorption des oligo-éléments n'est pas proportionnelle à l'augmentation de leur concentration ; ainsi, l'absorption n'augmente pas cinq fois pour une concentration cinq fois plus forte. Pour chacun des oligo-éléments, nous pouvons faire les constatations suivantes.

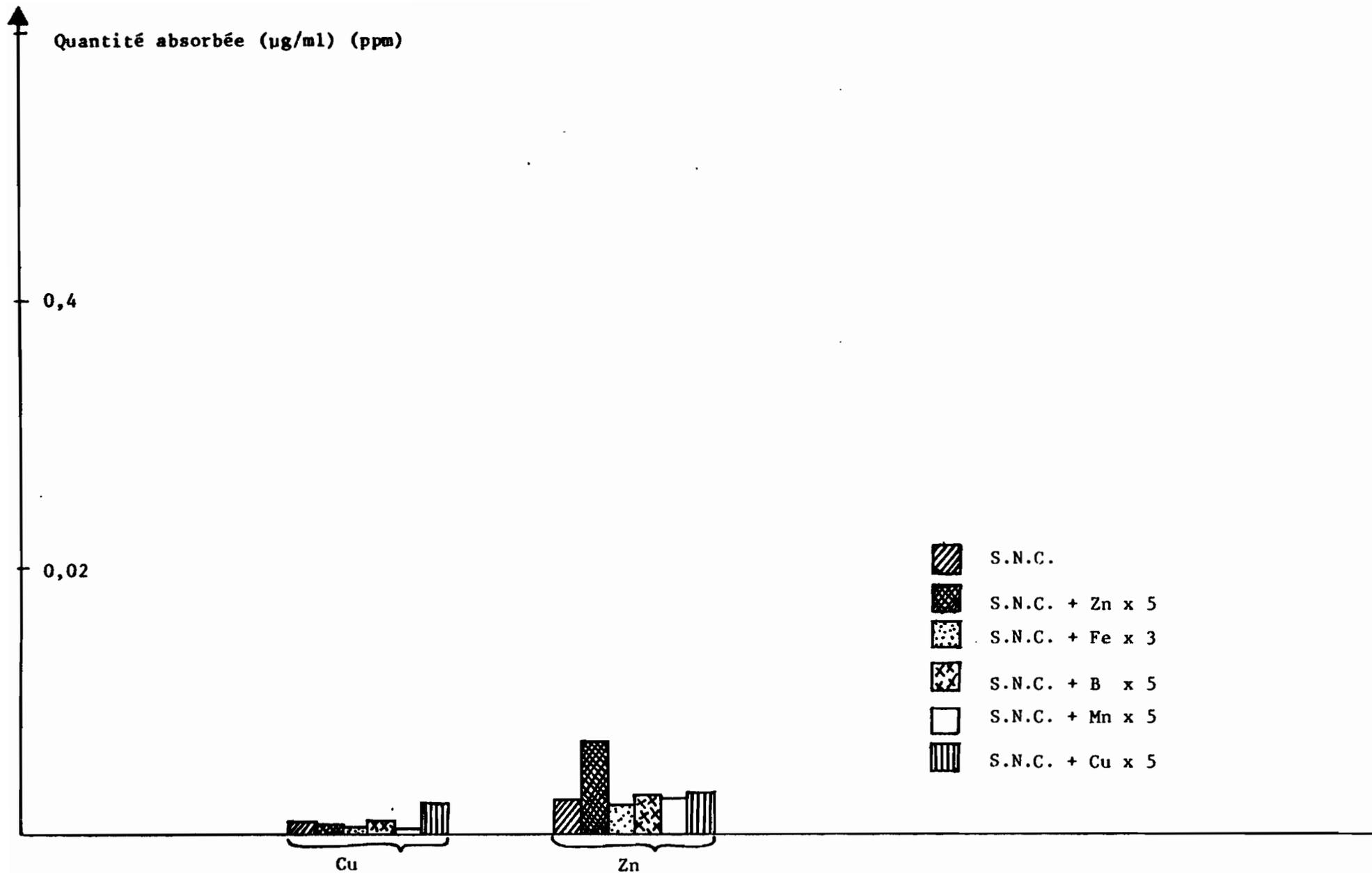


FIGURE 11 - Absorption des oligo-éléments en fonction de la composition des solutions nutritives. "TROISIEME ESSAI".

Le cuivre, d'après les histogrammes (figure 11) et le tableau 24, est mieux absorbé dans la solution nutritive complète que dans les autres solutions. D'autre part, il semble que le manganèse a une influence vraisemblablement négative sur l'absorption du cuivre ; en effet, quand nous augmentons cinq fois la concentration du manganèse dans la solution nutritive complète, nous constatons une diminution de la quantité de cuivre absorbée. Ceci n'a pas été remarqué dans les autres traitements.

Le zinc est relativement mieux absorbé en présence du cuivre en concentration cinq fois plus forte. C'est ce que nous montrent les histogrammes (figure 11) et le tableau 24. D'après ce tableau et ces histogrammes nous constatons une diminution assez nette de l'absorption du zinc lorsque la concentration du fer dans la solution est trois fois plus forte.

Le fer paraît, d'après les histogrammes (figure 12) et le tableau 24, mieux absorbé en solution nutritive complète que dans les autres solutions. L'augmentation de la concentration en zinc a une influence négative sur l'absorption du fer : nous pouvons le constater sur ces mêmes tableau et histogrammes et, étant donné le coefficient de corrélation (-0,948) entre le zinc et le fer, nous pensons qu'il y a un certain antagonisme entre ces deux éléments.

Par ailleurs, étant donné le faible coefficient de corrélation (0,406) entre le manganèse et le fer, et les résultats du tableau 24 et les histogrammes (figure 12), nous pouvons dire, sans confirmer, que le manganèse en concentration cinq fois plus forte que dans la solution nutritive complète a un faible effet négatif sur l'absorption du fer.

Le bore est moins absorbé en présence du zinc, en concentration cinq fois plus forte ; c'est ce que nous montrent le tableau 24 et les histogrammes (figure 12), ainsi que le coefficient de corrélation entre ces deux éléments (-0,122). Son absorption ne varie pratiquement pas dans les autres cas.

Le manganèse : nos résultats rassemblés dans le tableau 24 et concrétisés dans les histogrammes (figure 12) montrent que le cuivre peut avoir un effet négatif sur l'absorption du manganèse lorsqu'il est cinq fois plus fort que dans la solution nutritive complète, d'autant plus que le coefficient de corrélation est faible, même dans le traitement en

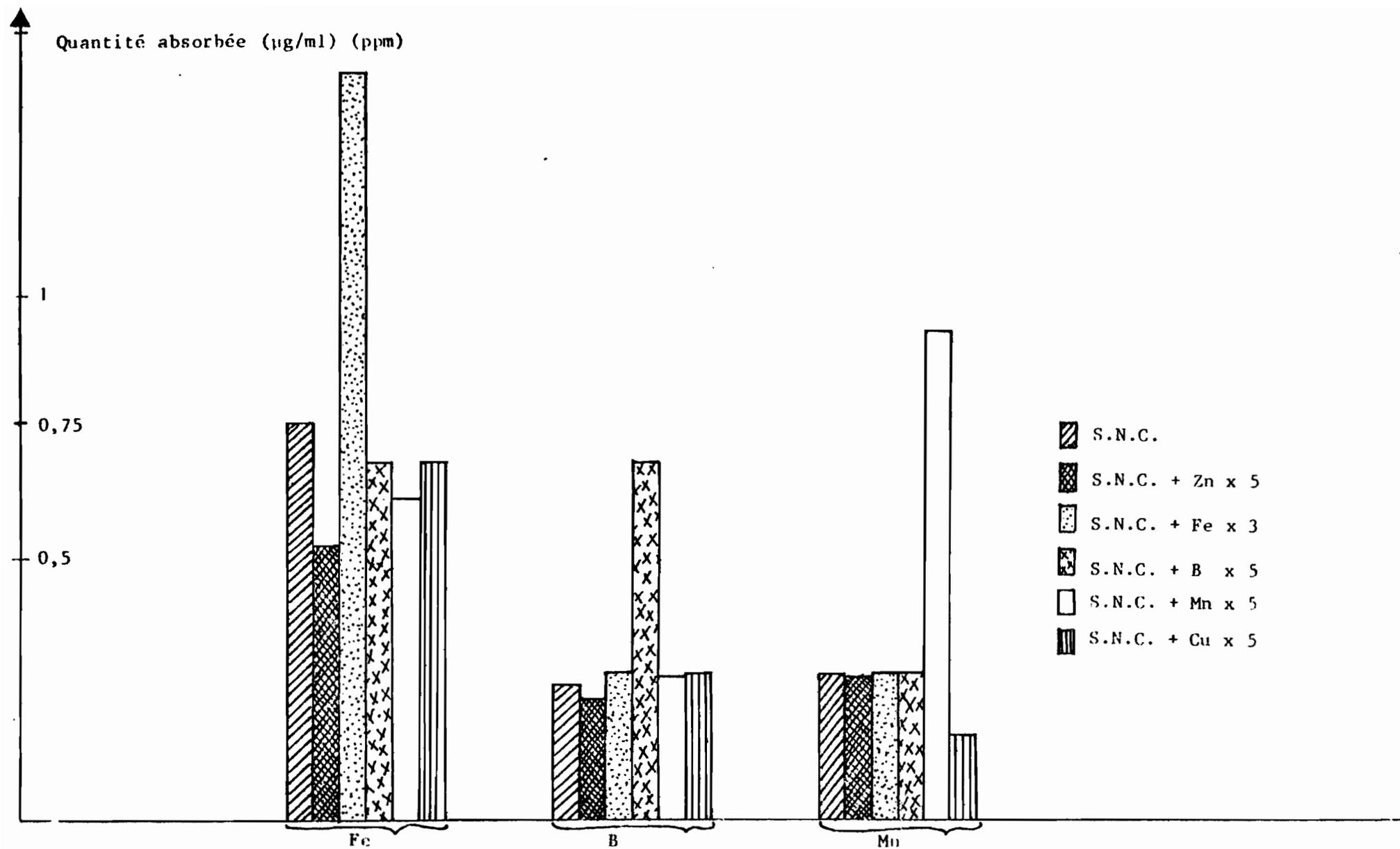


FIGURE 12 - Absorption des oligo-éléments en fonction des solutions nutritives.

"TROISIEME ESSAI".

TABLEAU 24 - Moyennes des quantités de chaque oligo-éléments, en µg/ml, absorbées durant le troisième essai dans les différentes solutions nutritives.

	Zn	Fe	B	Mn	Cu
S.N.C.	0,0264	0,759	0,259	0,280	0,0125
S.N.C. + Zn x 5	0,0689	0,523	0,232	0,276	0,0070
S.N.C. + Fe x 3	0,0225	1,423	0,284	0,280	0,0053
S.N.C. + B x 5	0,0281	0,686	0,686	0,282	0,0089
S.N.C. + Mn x 5	0,0276	0,615	0,275	0,935	0,0043
S.N.C. + Cu x 5	0,0288	0,684	0,282	0,165	0,023

TABLEAU 25 - Calcul statistique du dosage des teneurs en oligo-éléments à la fin du troisième essai. Résultats exprimés en µg/ml.

S.N.C.					
	Cu	Mn	Zn	B	Fe
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0075	0,210	0,0245	0,231	0,771
s	0,0005	0,0042	0,0022	0,0217	0,0526
CV %	6,91	1,99	8,96	8,78	6,84
S.N.C. + Zn x 5					
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0138	0,2140	0,1901	0,2575	0,9563
s	0,0013	0,0033	0,0038	0,0167	0,0338
CV %	0,45	1,56	2,02	6,48	3,94
S.N.C. + Fe x 3					
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0147	0,2193	0,0267	0,2213	2,9463
s	0,0011	0,0061	0,0027	0,0164	0,0625
CV %	7,37	2,80	9,99	7,42	2,12
S.N.C. + B x 5					
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0111	0,2183	0,0211	1,8013	0,8338
s	0,0007	0,0017	0,0011	0,0762	0,0297
CV %	5,99	0,76	5,33	4,23	3,57

TABLEAU 25 - Suite.

S.N.C. + Mn x 5					
	Cu	Mn	Zn	B	Fe
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0159	1,665	0,0216	0,2150	0,8650
s	0,007	0,0278	0,0014	0,0151	0,0515
CV %	4,35	1,67	6,55	7,03	5,96
S.N.C. + Cu x 5					
N	8	8	8	8	8
\bar{x}	0,0977	0,3248	0,0204	0,2225	0,8063
s	0,0096	0,0062	0,0012	0,0167	0,0378
CV %	0,99	1,90	5,76	7,50	4,68

Légende :

- S.N.C. : Solution nutritive complète.
 S.N.C. + Zn_x5 : Solution nutritive complète plus une concentration du zinc cinq fois plus forte que la S.N.C.
 S.N.C. + Fe_x3 : Solution nutritive complète plus une concentration du fer trois fois plus forte que la S.N.C.
 S.N.C. + B_x5 : Solution nutritive complète plus une concentration du bore cinq fois plus forte que la S.N.C.
 S.N.C. + Mn_x5 : Solution nutritive complète plus une concentration du manganèse cinq fois plus forte que la S.N.C.
 S.N.C. + Cu_x5 : Solution nutritive complète plus une concentration du cuivre cinq fois plus forte que la S.N.C.
 N : Nombre des données.
 \bar{x} : Moyenne.
 s : Ecart-type.
 CV % : Coefficient de variation.

solution nutritive complète. Par contre, il n'y a pratiquement pas de différence dans l'absorption du manganèse pour les autres traitements.

En outre, le tableau 25, dans lequel nous trouvons le calcul statistique des teneurs en oligo-éléments des solutions nutritives à la fin du troisième essai, montre que la différence entre les répétitions sont très acceptables, les coefficients de variation ne dépassant pas, en aucun cas, 10 %.

4.3. CONCLUSION.

L'analyse des solutions nutritives de nos deux premiers essais, ayant pour but d'étudier la quantité de chaque élément nutritif absorbée en fonction du temps et de la croissance des plantes, et ainsi nous permettant de savoir à quel stade de leur développement les plantes absorbent le plus de chacun des éléments, nous ont donné les résultats suivants :

- Le potassium est un élément relativement mieux absorbé en présence des oligo-éléments et la courbe de croissance du blé est semblable à la courbe d'absorption du potassium.
- Le calcium, comme la magnésium, n'est pas mieux absorbé en présence des oligo-éléments. Son absorption ne se fait pas de la même manière que celles des autres éléments, tandis que l'absorption du magnésium varie dans le même sens que la croissance.
- L'absorption du phosphore est favorisée par l'addition des oligo-éléments dans le milieu et la croissance des plantes suit son absorption.
- La courbe d'absorption du cuivre est parallèle à celle de la croissance du blé.
- La courbe de croissance du blé est semblable à celle de l'absorption

du manganèse ; cet élément est plus absorbé que le cuivre et le zinc.

- Pour la deuxième semaine, la courbe de croissance du blé est différente de celle de l'absorption du zinc.
- La courbe de croissance du blé est semblable à celle de l'absorption du fer qui est absorbé de la même façon quand les oligo-éléments sont ajoutés ou non au milieu.
- La courbe de croissance est semblable à celle de l'absorption du bore.
- Tous les éléments majeurs dosés sont absorbés en plus grande quantité pendant la première période des essais (les sept premiers jours)
- Tous les oligo-éléments dosés sont plus absorbés pendant les deux premières semaines.

Du troisième essai nous pouvons conclure que

- l'absorption des oligo-éléments n'est pas proportionnelle à l'augmentation de leur concentration ;
- le cuivre est mieux absorbé dans le cas de la solution nutritive complète que dans les autres traitements ; il semble aussi que le manganèse, en excès, a un effet négatif sur l'absorption du cuivre ;
- le fer, en concentration trois fois plus forte dans le milieu, diminue l'absorption du zinc, et de même le zinc, en excès, semble avoir une influence négative sur l'absorption du fer ;
- le fer est mieux absorbé dans le cas de la solution nutritive complète ;
- le bore paraît moins absorbé en présence d'une concentration en zinc cinq fois plus forte. Son absorption ne varie pratiquement pas dans les autres traitements ;
- le manganèse est apparemment moins absorbé en présence du cuivre en concentration cinq fois plus forte. Son absorption ne varie pratiquement pas dans les autres traitements.

5. DOSAGE DES ELEMENTS MAJEURS DANS LES DIFFERENTES PARTIES DES PLANTES.

Ce dosage est fait à la fin de chacun des deux premiers essais, pour chaque partie des plantes qui ont subi le même traitement ; les éléments dosés sont le calcium, le potassium, le magnésium et le phosphore. Les résultats de ces dosages sont rassemblés dans les tableaux 26 et 27 qui nous donnent la répartition de ces éléments dans les feuilles, les gaines, les racines et les graines ; de même, ces résultats sont représentés par les figures 13, 14, 15 et 16.

Le tableau 26 et les courbes qui représentent les résultats du premier essai nous montrent que, d'une façon générale,

- pendant la durée de l'essai il n'y a pas de variation significative du taux d'éléments majeurs dans les plantes que les solutions nutritives aient été renouvelées ou non ;
- par contre, les concentrations en éléments majeurs diffèrent beaucoup d'un organe à l'autre, même dans les plantes qui poussent dans le même milieu ;
- ces concentrations sont plus fortes dans les plantes cultivées en solutions nutritives complètes (S.N.C.) que celles cultivées en solutions nutritives de macro-éléments (S.N.M.).

Le calcium se trouve en concentration maximale dans les gaines : 0,74 % de la matière sèche pour la S.N.C. renouvelée chaque semaine, 0,73 % pour la S.N.C. non renouvelée durant les quatre semaines. Cette concentration est de 0,67 % pour la S.N.M. renouvelée et de 0,65 % pour la S.N.M. non renouvelée (voir tableau 26 et figure 13).

Le magnésium, comme le calcium, est en concentration plus grande dans les gaines que dans les autres organes de la plante ; cependant, la différence n'est pas aussi importante que dans le cas du calcium : 0,36 % dans les gaines contre 0,33 % dans les feuilles pour les mêmes solutions ; les racines ne sont pas aussi riches en magnésium : 0,22 % comme le montrent le tableau 26 et la figure 14.

Il en va de même pour le potassium qui, comme le montrent le tableau 26 et la figure 15, s'accumule dans les gaines avec une variation

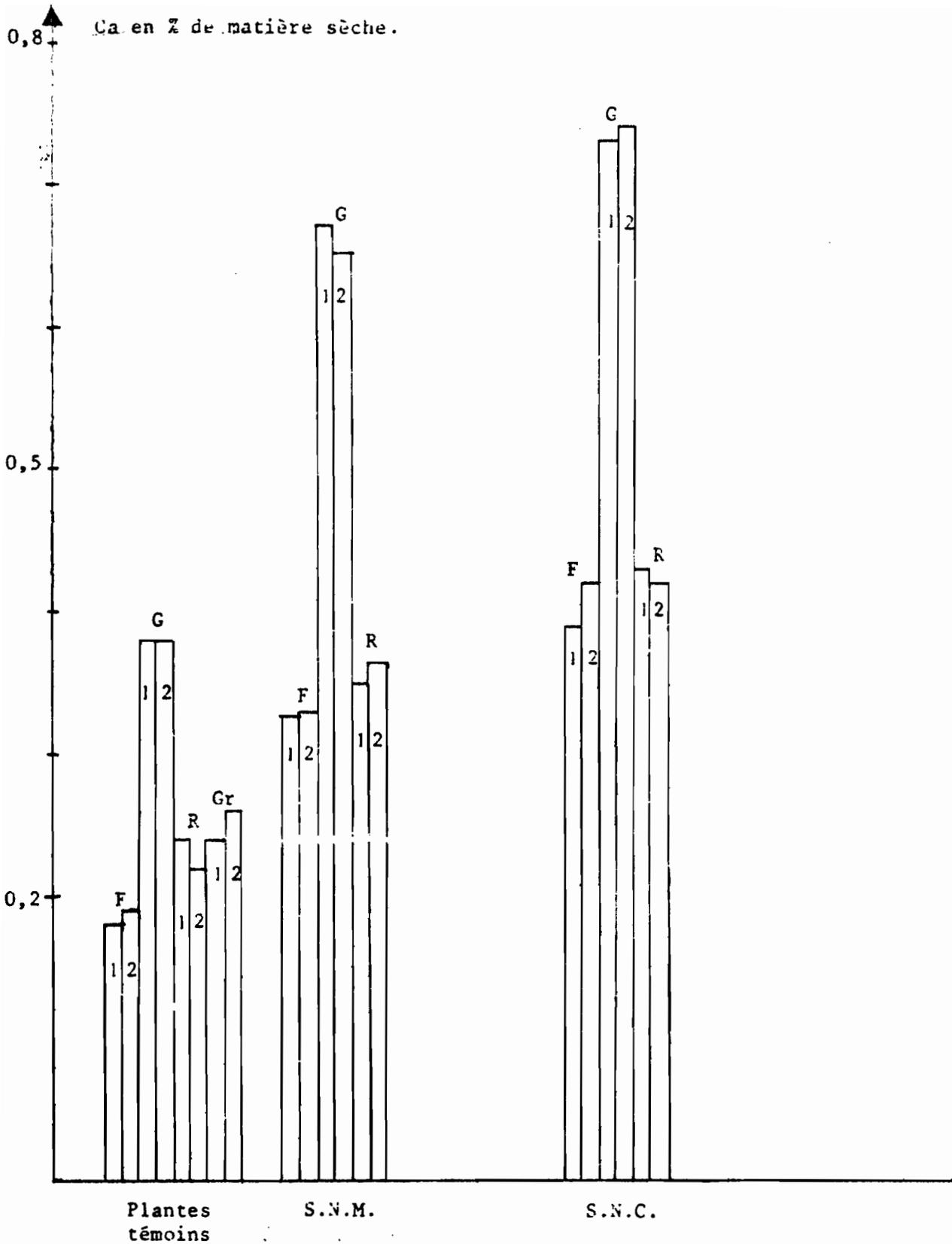


FIGURE 13 - Teneur en calcium dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

- F : feuille
- G : gaine
- R : racine
- Gr : graine
- 1 : plantes cultivées sur S.N. non renouvelée
- 2 : plantes cultivées sur S.N. renouvelée.

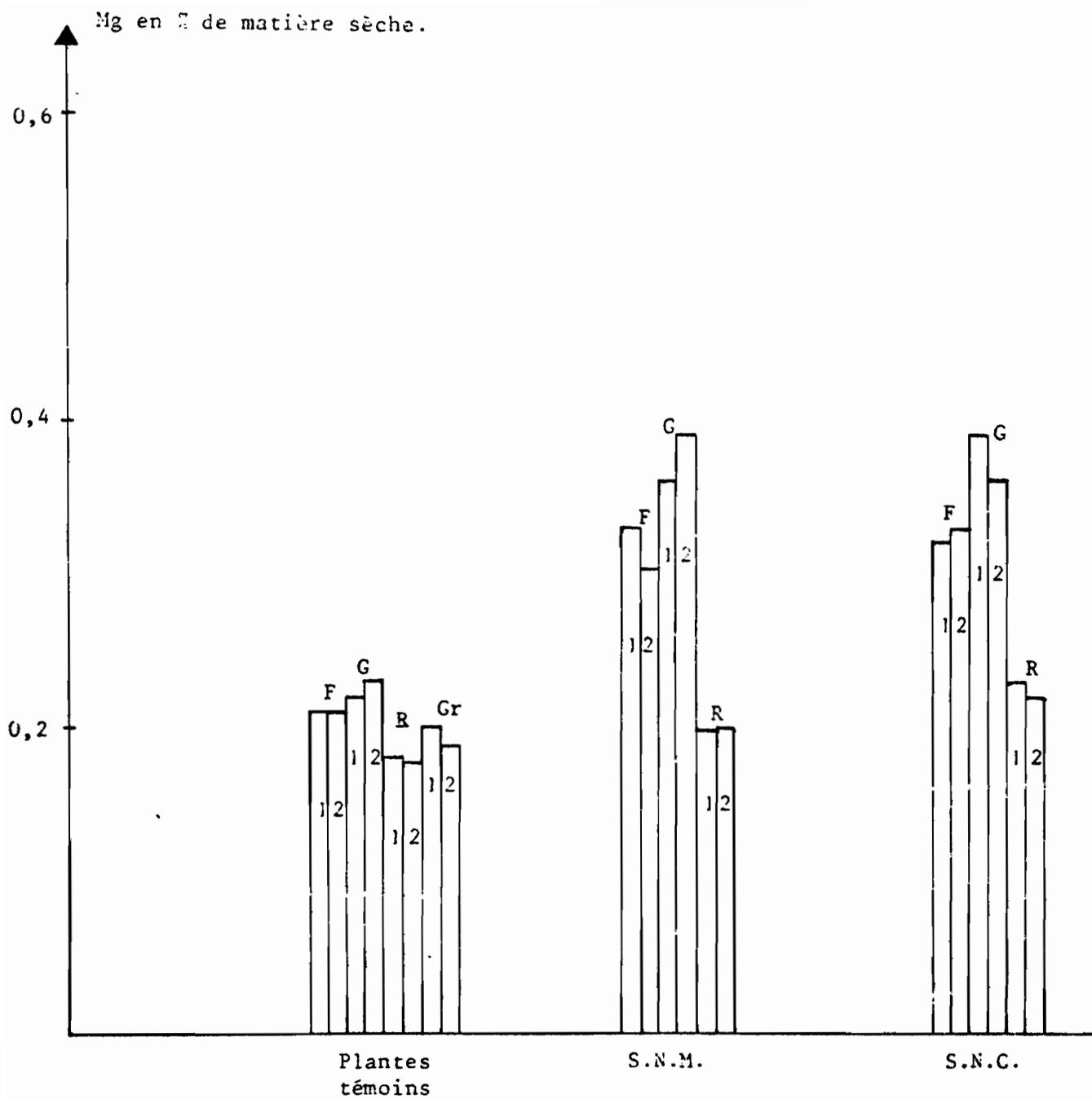


FIGURE 14 - Teneur en magnésium dans les différents organes de la plante en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

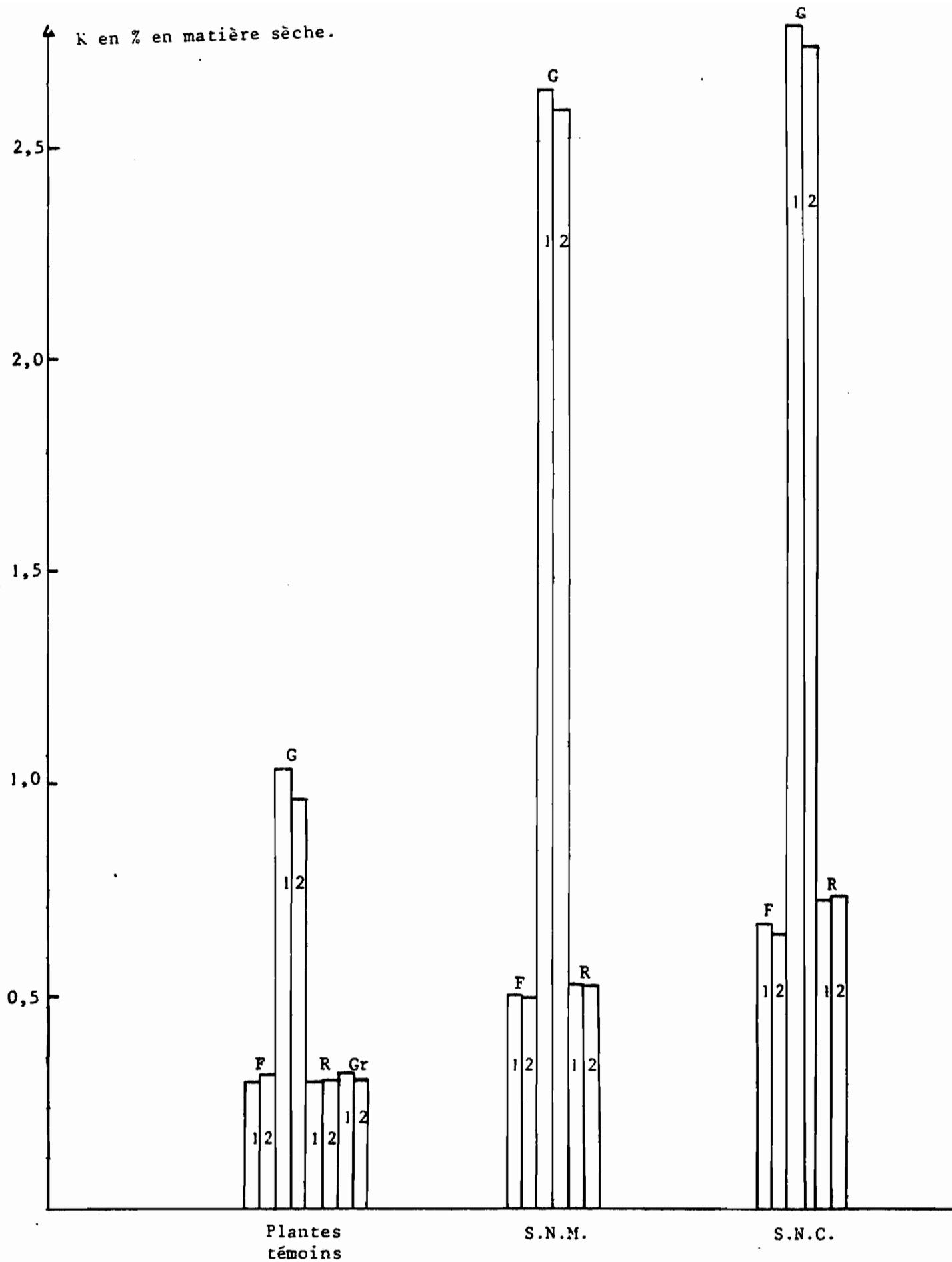


FIGURE 15 - Teneur en potassium dans les différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

TABLEAU 26 - Répartition de certains éléments majeurs dans les différents organes de la plante, en % de la matière sèche.

Premier essai.

Répétition	Feuilles			Gainés			Racines			Graines
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
		Ca			Ca			Ca		
A	0,18	0,324	0,39	0,38	0,67	0,73	0,24	0,35	0,43	0,24
B	0,19	0,33	0,418	0,38	0,65	0,74	0,22	0,366	0,42	0,26
		Mg			Mg			Mg		
A	0,21	0,33	0,32	0,22	0,36	0,39	0,18	0,198	0,23	0,19
B	0,21	0,30	0,33	0,23	0,39	0,36	0,177	0,20	0,22	0,20
		K			K			K		
A	0,30	0,511	0,684	1,053	2,67	2,822	0,294	0,537	0,737	0,32
B	0,32	0,509	0,657	0,975	2,612	2,767	0,300	0,527	0,740	0,302
		P			P			P		
A	0,447	1,146	1,243	0,365	0,678	0,832	0,190	0,445	0,505	0,299
B	0,479	1,190	1,214	0,361	0,657	0,862	0,183	0,435	0,516	0,309

Légende :

- 1 : Cas des plantes témoins (cultivées dans l'eau de ville).
- 2 : Cas des plantes cultivées sur solution nutritive sans oligo-élément (S.N.M.)
A - solution nutritive non renouvelée.
- 3 : Cas des plantes cultivées sur solution nutritive avec oligo-éléments (S.N.C.)
B - solution nutritive renouvelée.

TABLEAU 27 - Répartition de certains éléments majeurs dans les différents organes de la plante en % de la matière sèche.

Deuxième essai.

Répétition	Feuilles		Gainés		Racines		Graines		
	1	2	1	2	1	2	1	2	3
A	Ca 0,356 0,420		Ca 0,634 0,73		Ca 0,364 0,40		0,347	Ca 0,316	0,423
B	0,372 0,40		0,648 0,75		0,376 0,39		0,362	0,329	
A	Mg 0,30 0,319		Mg 0,345 0,382		Mg 0,209 0,210		0,216	Mg 0,194	0,314
B	0,32 0,333		0,364 0,392		0,217 0,231		0,228	0,21	
A	K 0,549 0,675		K 2,639 2,629		K 0,50 0,723		0,351	K 0,327	0,464
B	0,558 0,631		2,554 2,615		0,528 0,691		0,371	0,331	
A	P 1,163 1,235		P 0,678 0,870		P 0,471 0,521		0,318	P 0,195	0,525
B	1,208 1,241		0,638 0,857		0,439 0,498		0,335	0,215	

Légende :

- 1 : Cas des plantes cultivées sur solutions nutritives sans oligo-élément (S.N.M.)
- 2 : Cas des plantes cultivées sur solutions nutritives avec oligo-éléments (S.N.C.)
- 3 : Graines non germées.

A - S.N. non renouvelée
B - S.M. non renouvelée.

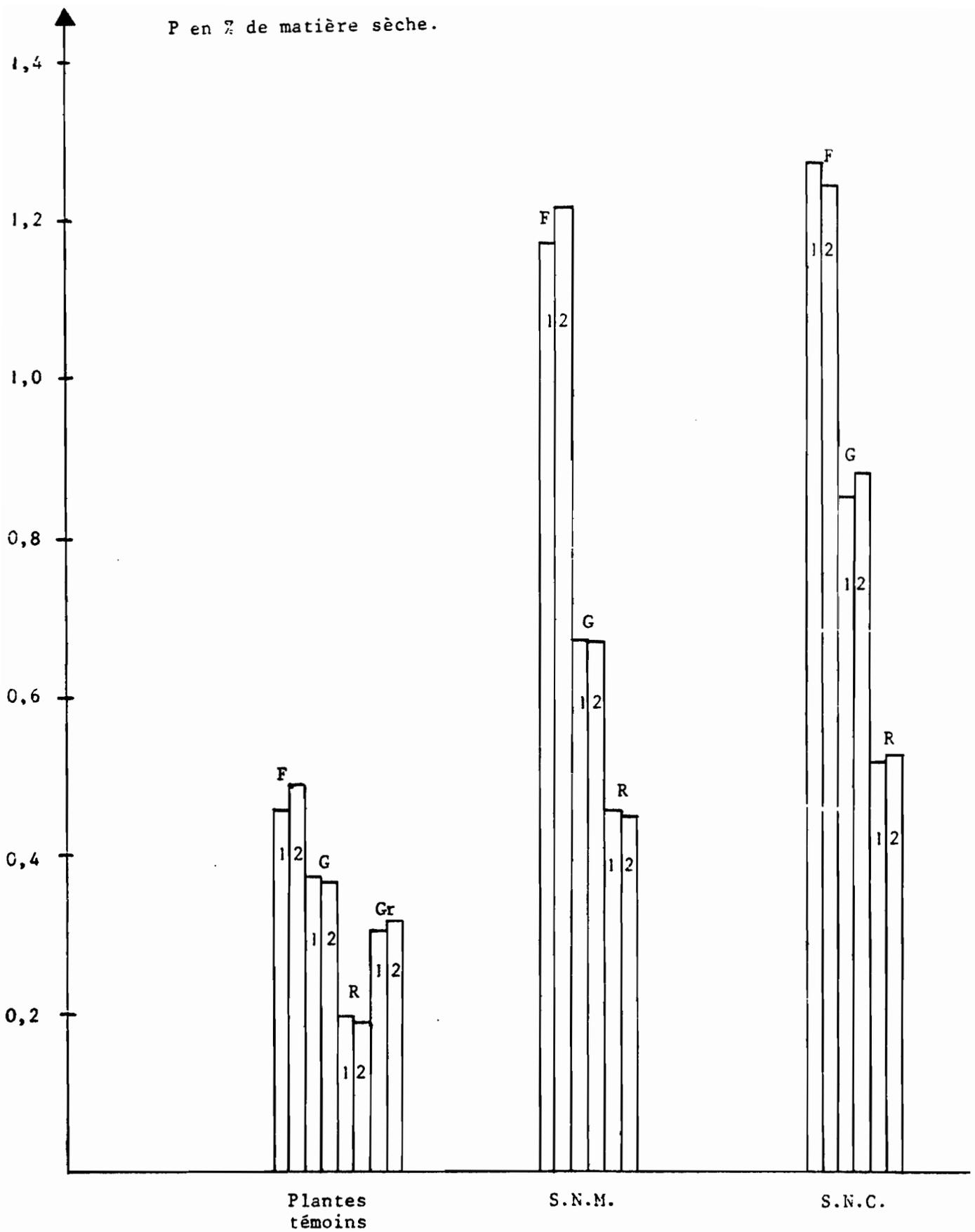


FIGURE 16 - Teneur en P dans les différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

très importante par rapport aux autres organes ; sa teneur atteint 2,82 % dans les gaines contre 1,05 % dans les feuilles et 0,74 % dans les racines pour les plantes qui poussent dans les mêmes solutions et dans les mêmes conditions. La différence entre les concentrations dans les plantes cultivées en solution renouvelée ou non n'est pas importante : 0,511 % pour les feuilles des plantes cultivées en S.N.M. non renouvelée, 0,509 % pour les feuilles des plantes cultivées en S.N.M. renouvelée.

Pour le phosphore, à l'opposé des autres éléments, comme le montrent le tableau 26 et la figure 16, les quantités les plus importantes apparaissent dans les feuilles : 3,81 % pour la S.N.C. renouvelée et 3,51 % pour la S.N.M. renouvelée contre 2,55 % et 2,08 % dans les gaines pour les mêmes solutions. D'ailleurs, comme pour les autres éléments, la différence de teneurs dans les différents organes des plantes cultivées en solution nutritive avec ou sans renouvellement, à la fin de chaque semaine, n'est pas importante.

Le deuxième essai nous a donné des résultats très semblables, comme on le constate dans le tableau 27, à ceux obtenus dans le premier essai.

Etant donné que nous ne possédons pas beaucoup de données, nous n'avons pas pu faire une étude statistique pour les deux essais.

6. DOSAGE DES OLIGO-ELEMENTS DANS LES DIFFERENTES PARTIES DES PLANTES.

Nous avons fait le dosage des cinq oligo-éléments déjà cités (Cu, Mn, Fe, B et Zn) sur les trois essais.

Ce dosage a pour but l'étude de l'assimilabilité des oligo-éléments par les différents organes des plantes, cultivées sur des milieux différents, et de la possibilité de leur accumulation plus forte dans un organe que dans un autre. En outre, dans le troisième essai, nous

avons tenté d'étudier l'influence de l'augmentation des concentrations en oligo-éléments sur la quantité assimilée par les plantes, par comparaison avec un milieu où les oligo-éléments se trouvent au taux considéré comme nécessaire à une croissance et un développement normaux des plantes pour montrer s'il existe ou non une possibilité d'enrichir en ces éléments les différentes parties de la plante.

6.1. Cas des oligo-éléments en concentrations suffisantes dans le milieu.

Les résultats obtenus pour le premier essai sont donnés dans le tableau 28. Dans cet essai, nous n'avons pas dosé les oligo-éléments dans les graines ; dans les autres organes, les résultats concernant chaque oligo-élément sont les suivants (étant donné que nous ne disposons pas beaucoup de données, nous n'avons pas pu faire de test statistique pour cet essai et nous avons calculé la différence en pourcentage).

- Le manganèse, comme l'indiquent le tableau 28 et les histogrammes (figure 17), dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive complète, se trouve davantage dans les gaines ; la différence est très nette entre la quantité du manganèse dans les gaines et celle trouvée dans les autres organes : elle est de 24,2 % entre les gaines et les feuilles et de 33,9 % entre les gaines et les racines. En cas de renouvellement des solutions, la différence n'est pas importante ; en aucun cas elle ne dépasse 10 %. Par contre, dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive des macro-éléments, le manganèse se trouve davantage dans les feuilles.

- Le cuivre, d'après le tableau 28 et la figure 18, est très nettement accumulé dans les racines ; nous constatons que cette accumulation a lieu pour tous les traitements. Dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive complète renouvelée (S.N.C.), la différence entre les racines et les gaines est de 198,6 % et de 443,6 % entre les racines et les feuilles ; elle est de 236,2 % entre les racines et les gaines et de 347,3 % entre les racines et les feuilles dans le cas de la solution nutritive des macro-éléments. Donc, nous constatons que les feuilles assimilent la plus faible quantité de cuivre.
La différence entre les mêmes traitements n'est pas importante dans le cas de renouvellement ou non de la solution ; en aucun cas elle ne dépasse 10 %.

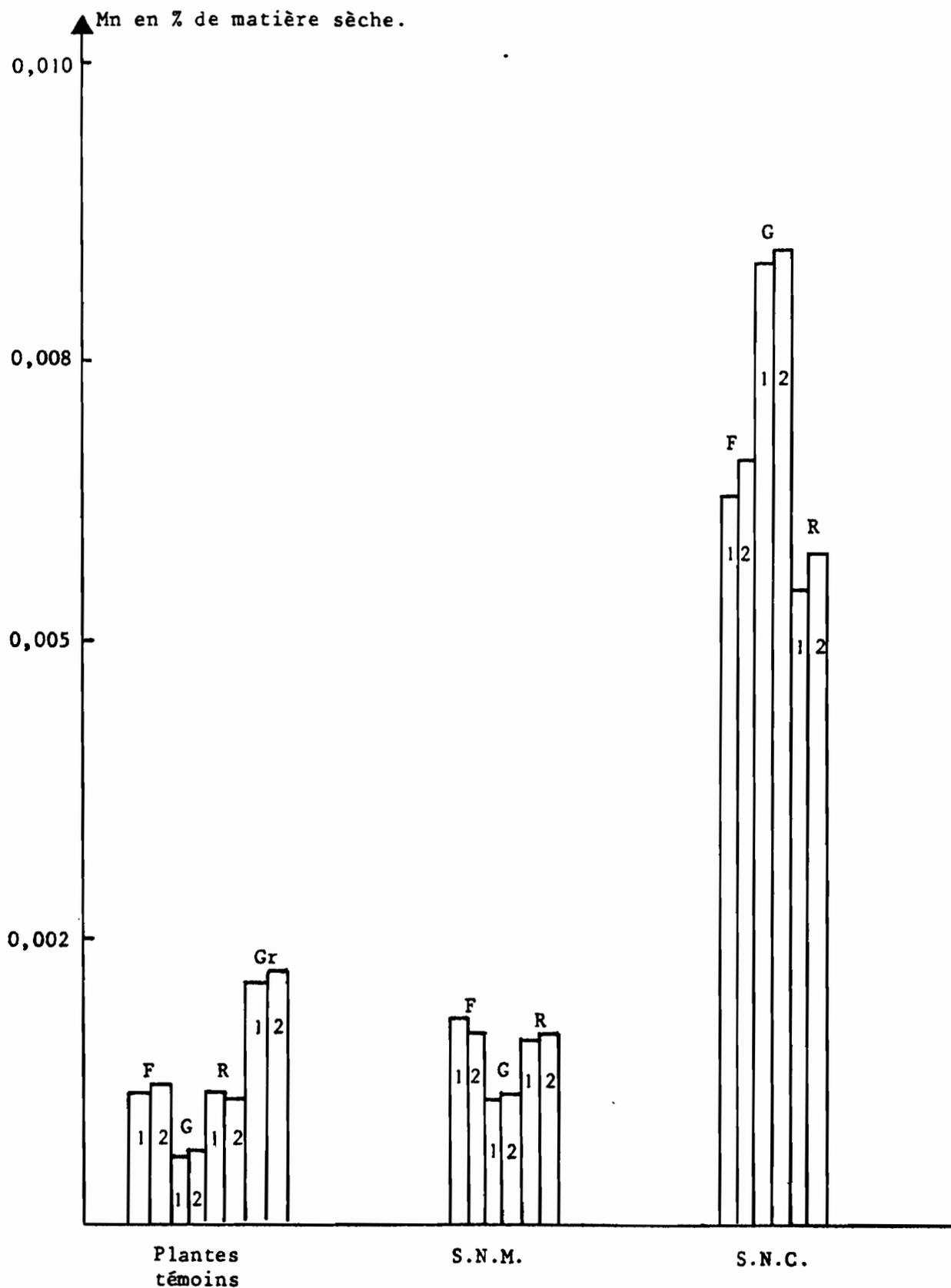


FIGURE 17 - Teneur en manganèse dans les différents organes en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

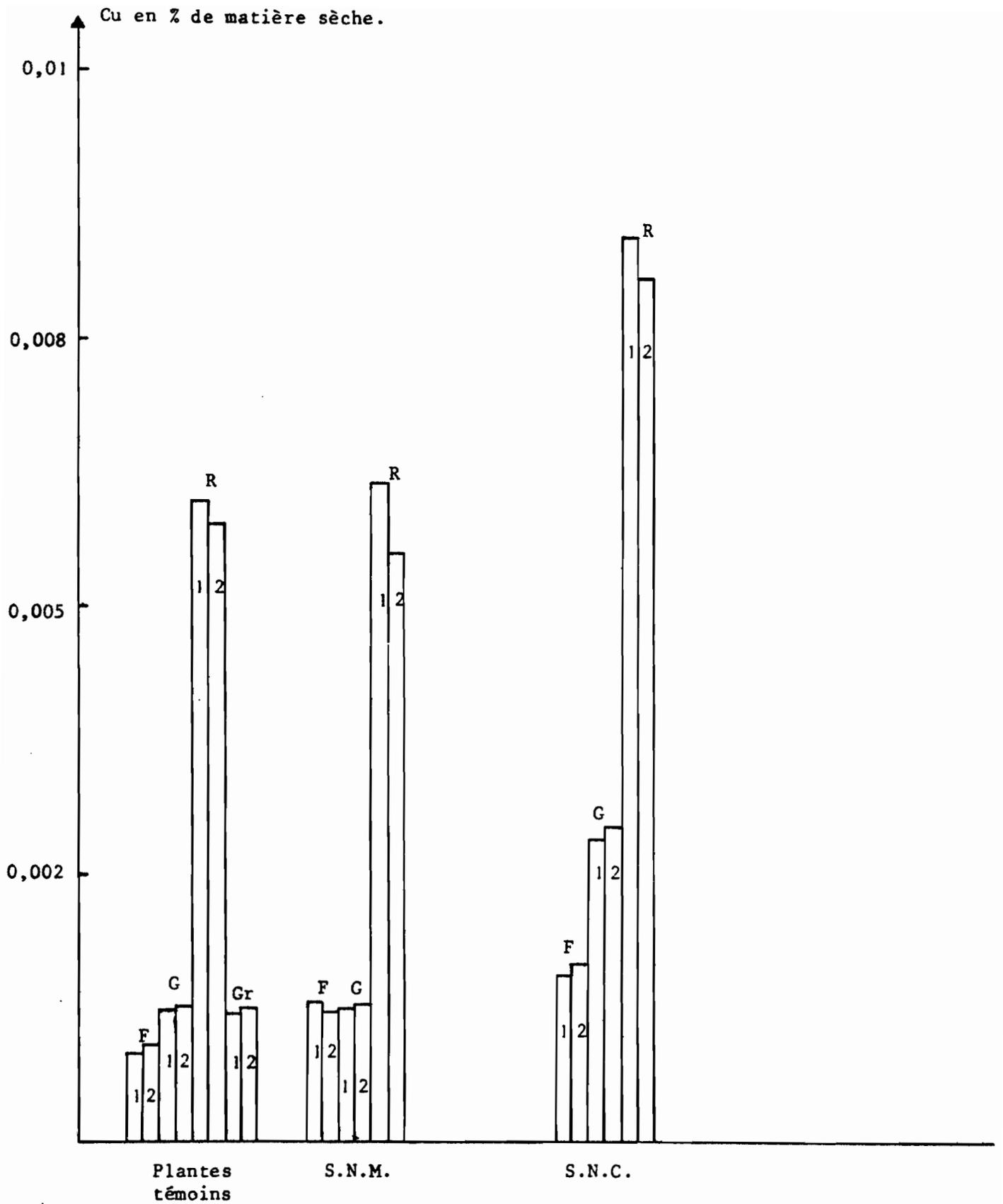


FIGURE 18 - Teneur en cuivre dans les différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

TABLEAU 28 - Répartition des oligo-éléments, en % de matière sèche, dans les différents organes des plants de blé.

Premier essai.

organe	Traitement	Mn			Cu		
		Feuilles	Gaines	Racines	Feuilles	Gaines	Racines
* S.N.M.	1	0,00163	0,00111	0,00165	0,001225	0,00163	0,00548
	2	0,00176	0,00105	0,00158	0,001313	0,00175	0,00616
** S.N.C.	1	0,00625	0,00825	0,00545	0,00156	0,00284	0,00848
	2	0,00657	0,00833	0,00578	0,00168	0,00296	0,00807
Zn							
* S.N.M.	1	0,00118	0,00169	0,00155	0,00267	0,00263	0,00354
	2	0,00123	0,00166	0,00153	0,00268	0,00258	0,0035
** S.N.C.	1	0,00331	0,00525	0,00301	0,00349	0,00329	0,00592
	2	0,00305	0,00461	0,00341	0,00386	0,00310	0,00608
B							
Fe							
* S.N.M.	1	0,00687	0,01069	0,07469			
	2	0,00773	0,00902	0,07296			
** S.N.C.	1	0,00845	0,03703	0,12293			
	2	0,00783	0,03472	0,11541			

Légende :

- * : Plantes cultivées sur solution nutritive de macro-éléments (S.N.M.).
- ** : Plantes cultivées sur solution nutritive complète (S.N.C.).
- 1 : Solution nutritive renouvelée à la fin de chaque semaine.
- 2 : Solution nutritive non renouvelée.

- Le zinc se trouve en quantité relativement faible dans tous les organes du blé et la différence d'assimilabilité n'est pas aussi importante que pour le cuivre. Les gaines sont les plus riches en zinc. Les feuilles et les racines contiennent presque les mêmes quantités ; nous pouvons le constater sur la figure 19 et le tableau 28. Par contre, dans le traitement en solution nutritive complète renouvelée, la quantité de zinc dosée dans les gaines diffère de 58,6 % de celle dosée dans les feuilles, et de 74,4 % de celle dosée dans les racines.

- Le bore : dans les feuilles et les gaines, les quantités de bore assimilées sont à peu près semblables ; elles sont nettement plus fortes dans les racines comme nous l'indiquent le tableau 28 et les histogrammes (figure 20). La différence entre les feuilles et les racines, dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive des macro-éléments renouvelée, est de 32,6 % et elle est de 34,6 % entre les racines et les gaines ; cette différence atteint 69,6 % entre les racines et les feuilles, et 79,9 % entre les racines et les gaines dans le cas des solutions nutritives complètes (S.N.C.) renouvelées. Nous voyons sur les histogrammes (figure 20), que la différence entre les mêmes traitements, en fonction du renouvellement ou non des solutions nutritives, n'est pas remarquable.

- Le fer est l'oligo-élément le plus assimilé parmi ceux étudiés ; il se trouve en quantité beaucoup plus forte que les autres oligo-éléments. Nous pouvons facilement le remarquer sur le tableau 28 et les histogrammes (figure 21) ; d'après nos résultats, le fer s'accumule dans les racines, et dans les feuilles il se trouve en quantité moindre que dans les autres organes. Il est six fois plus fort dans les racines que dans les gaines, et presque dix fois (9,87 fois) plus fort dans les racines que dans les feuilles dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive de macro-éléments renouvelée. Dans les racines, dans le cas de la solution nutritive de macro-éléments non renouvelée, la teneur en fer est sept fois plus importante que celle dosée dans les gaines, et huit fois (8,43) plus forte que celle trouvée dans les feuilles.

Dans le cas de la solution nutritive complète renouvelée, la différence de teneur entre les racines et les feuilles est multipliée par 13,5.

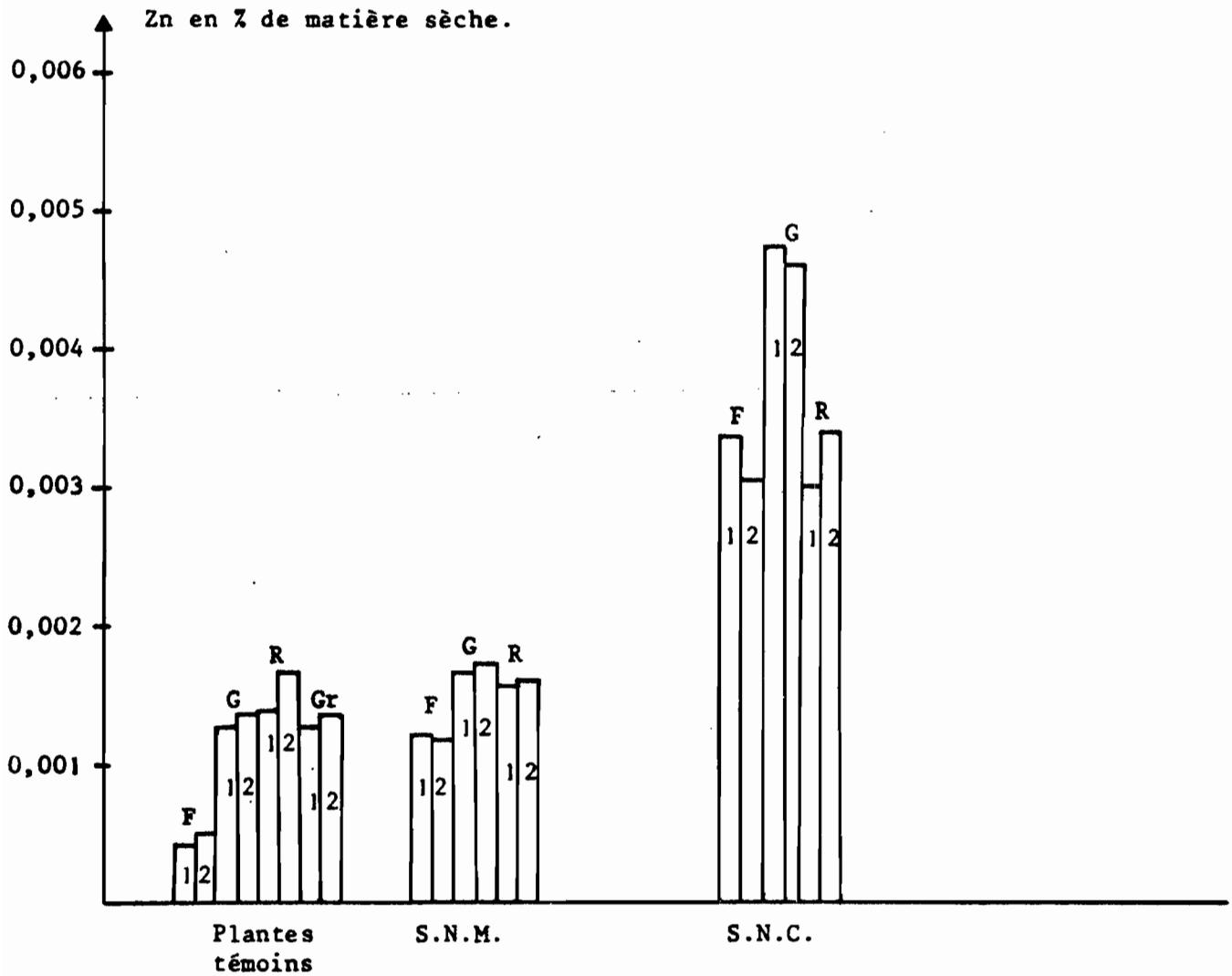


FIGURE 19 - Teneur en zinc des différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

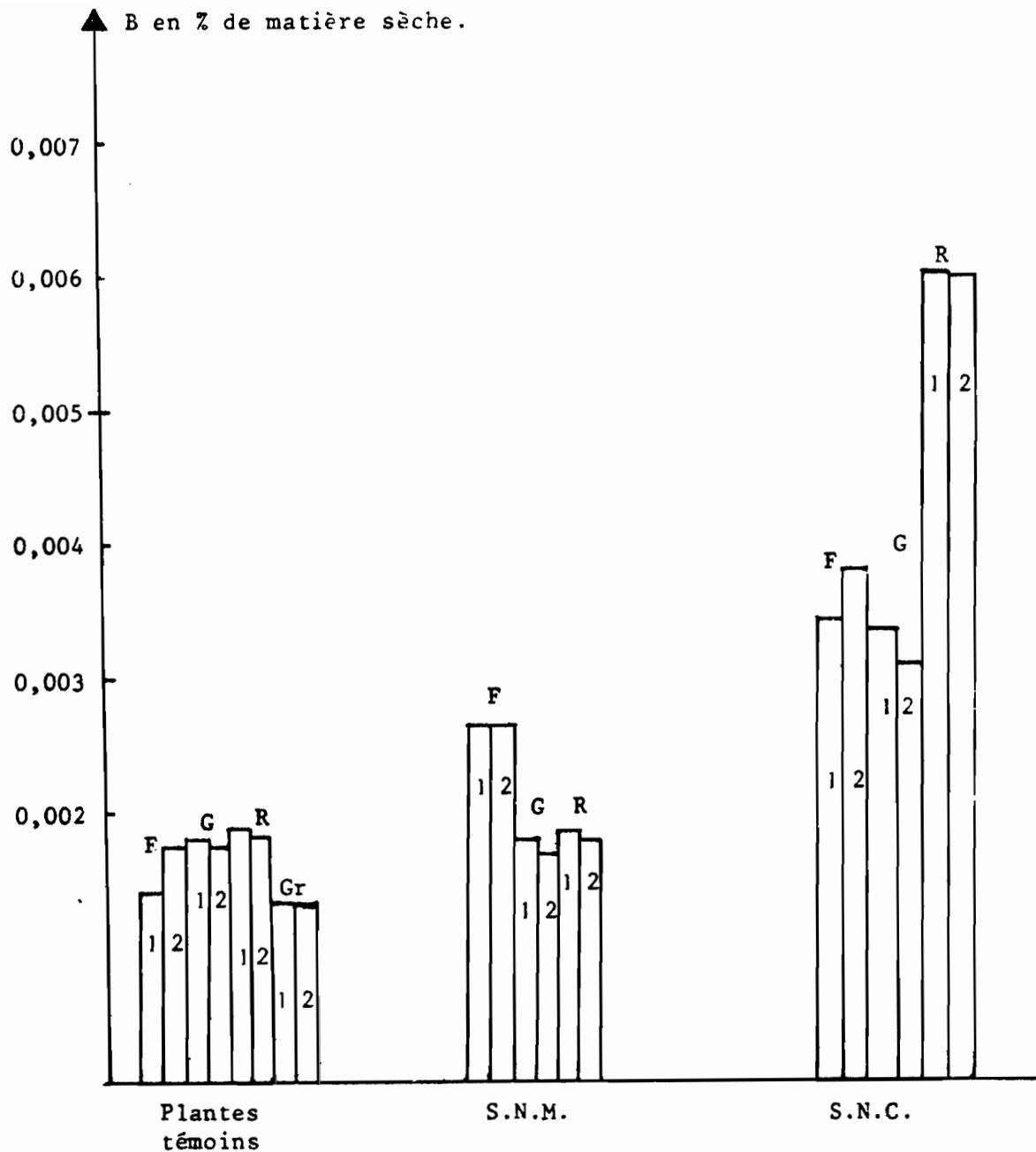


FIGURE 20 - Teneur en bore dans les différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

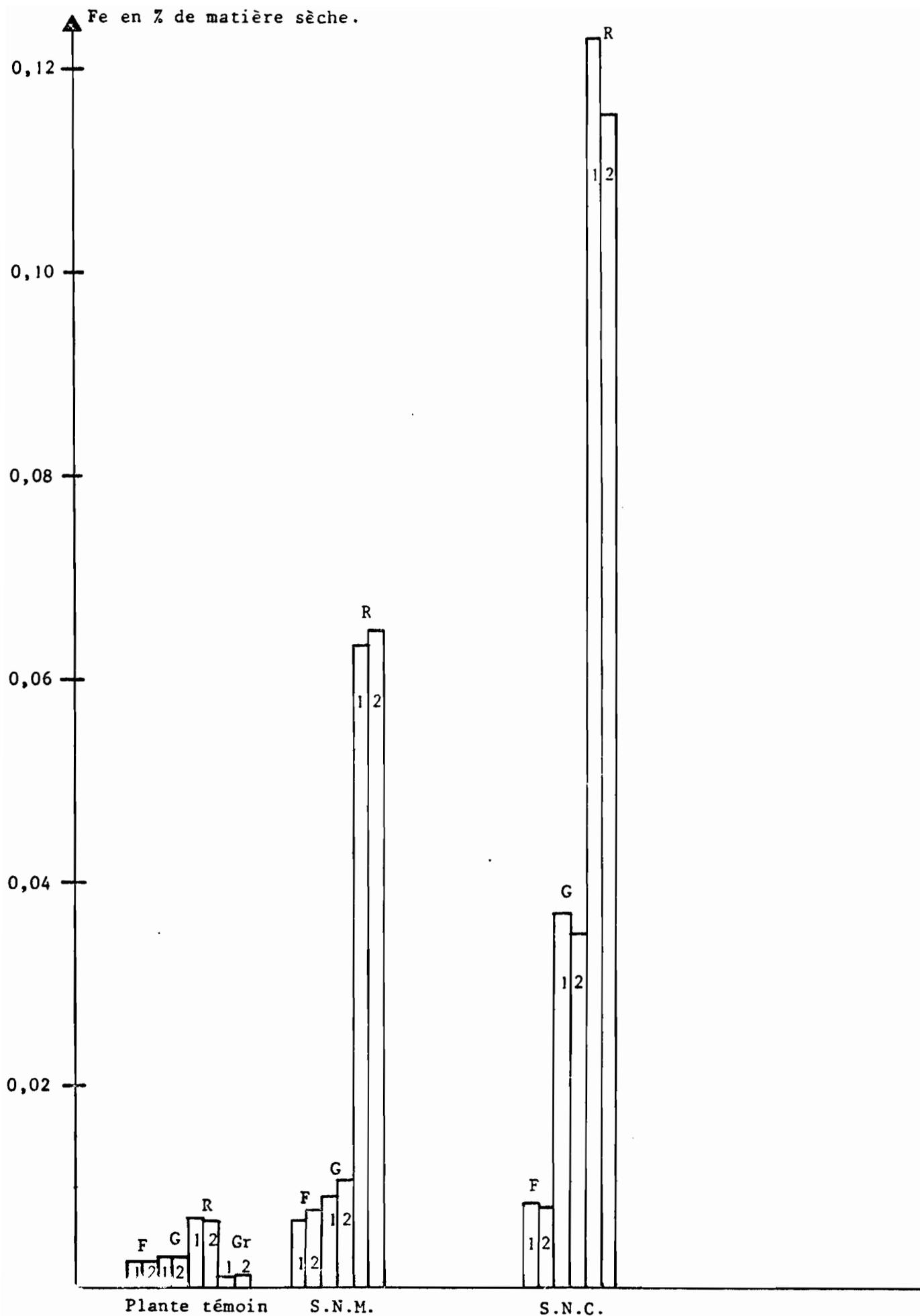


FIGURE 21 - Teneur en fer dans les différents organes du blé en fonction du milieu nutritif. "PREMIER ESSAI".

Par contre, la différence entre les mêmes traitements, en fonction de renouvellement ou non des solutions nutritives, n'est pas remarquable.

Le deuxième essai nous a donné des résultats semblables à ceux obtenus dans le premier, et par conséquent, il les confirme ; les résultats sont rassemblés dans le tableau 29.

Dans le deuxième essai, le dosage des graines a été fait. Nous donnons les résultats dans le tableau 29 ; ces résultats montrent que, dans la plupart des cas, les graines sont moins riches en oligo-éléments quand les solutions nutritives ne sont pas renouvelées ; cette différence atteint 10,1 % pour le fer dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive de macro-éléments.

D'autre part, le dosage des graines, avant et après la germination, nous a montré que, pendant la germination, les plants n'absorbent pas tous les oligo-éléments qu'ils renferment : dans certains cas, ils n'en absorbent que la moitié (cas du manganèse des plantes cultivées sur solution nutritive complète) ; en effet, la quantité assimilée au cours de la germination est égale à 52,8 % de celle trouvée dans les graines avant la germination, dans le cas où la quantité trouvée, après la germination, est rapportée au poids des graines après la germination ; elle est égale à 92,5 % dans le cas où la quantité trouvée après la germination est rapportée au poids des graines avant la germination.

6.2. Cas des oligo-éléments en excès dans le milieu.

D'après le tableau 30, le troisième essai, fait sur des solutions nutritives de concentrations différentes en oligo-éléments, nous a montré, d'une façon générale, la difficulté inhérente à la plante de s'enrichir en oligo-éléments, et nous pouvons dire que la quantité d'oligo-éléments dans la plante n'augmente pas proportionnellement au taux de ces oligo-éléments dans la solution nutritive (par exemple, si on multiplie le taux de cuivre par cinq, la quantité, dans n'importe quel organe, n'augmente pas de plus de deux fois : voir tableau 30 et figure 23).

En ce qui concerne chaque oligo-élément, pris séparément, nous avons obtenu les résultats suivants.

TABLEAU 29 - Répartition des oligo-éléments, en % en matière sèche, dans les différents organes des plants de blé.

Deuxième essai.

Organe Traitement	Mn				Cu				Zn				
		Feuilles	Gaines	Racines	Graines	Feuilles	Gaines	Racines	Graines	Feuilles	Gaines	Racines	Graines
* S.N.M.	1	0,00151	0,000928	0,00164	0,00214	0,00134	0,00153	0,00599	0,00346	0,00185	0,00192	0,00176	0,00356
	2	0,00148	0,00110	0,00167	0,00199	0,00138	0,00170	0,00562	0,00316	0,00192	0,00172	0,00157	0,00358
** S.N.C.	1	0,00589	0,00858	0,00564	0,00250	0,00154	0,00286	0,00836	0,00389	0,00326	0,00431	0,00334	0,00388
	2	0,00605	0,00839	0,00548	0,00250	0,00167	0,00270	0,00822	0,00415	0,00333	0,00401	0,00343	0,00381
		B				Fe							
* S.N.M.	1	0,00266	0,00240	0,00038	0,00298	0,00779	0,0111	0,0385	0,0214				
	2	0,00288	0,00244	0,00048	0,00287	0,00722	0,0128	0,0388	0,0236				
** S.N.C.	1	0,00337	0,00378	0,00712	0,00222	0,00922	0,0396	0,115	0,062				
	2	0,00350	0,00366		0,00225	0,00850	0,0360	0,1169	0,061				

Légende :

- * : Plantes cultivées sur solution nutritive de macro-éléments.
- ** : Plantes cultivées sur solution nutritive complète.
- 1 : Solution nutritive renouvelée à la fin de chaque semaine.
- 2 : Solution nutritive non renouvelée.

TABLEAU 30 - Répartition des oligo-éléments, en % de matière sèche, dans les différents organes des plants de blé.

Troisième essai.

	Mn				Cu				Zn			
	Jeunes feuilles	Première feuille	Racines	Graines	Jeunes feuilles	Première feuille	Racines	Graines	Jeunes feuilles	Première feuille	Racines	Graines
S.N.C.	0,00513	0,00682	0,00589	0,00496	0,00114	0,00227	0,00784	0,00368	0,00291	0,00283	0,00348	0,00339
S.N.C.+Mnx5	0,0127	0,0161	0,0191	0,00764	0,00115	0,00203	0,00617	0,00397	0,00313	0,00418	0,00353	0,00320
S.N.C.+Cux5	0,00472	0,00667	0,00780	0,00511	0,00228	0,00449	0,00783	0,00426	0,00322	0,00404	0,00320	0,00125
S.N.C.+Znx5	0,00596	0,00673	0,00678	0,00559	0,00108	0,00256	0,00549	0,00409	0,00502	0,00661	0,00895	0,00669
S.N.C.+ Bx5	0,00506	0,00705	0,00696	0,00632	0,00117	0,00227	0,00619	0,00347	0,00345	0,00282	0,00392	0,00338
S.N.C.+Fex3	0,00573	0,00703	0,00859	0,00532	0,00122	0,00281	0,00606	0,00386	0,00246	0,00252	0,00372	0,00240
	B				Fe							
S.N.C.	0,00334	0,0114	0,00658	0,00919	0,00679	0,00720	0,133	0,0182				
S.N.C.+Mnx5	0,00355	0,0117	0,00672	0,00856	0,00672	0,0113	0,105	0,0201				
S.N.C.+Cux5	0,00324	0,00961	0,00543	0,00919	0,00681	0,0125	0,131	0,0182				
S.N.C.+Znx5	0,00346	0,00961	0,00902	0,0114	0,00611	0,0157	0,113	0,0148				
S.N.C.+ Bx5	0,00964	0,0189	0,00902	0,00868	0,00667	0,0110	0,140	0,0172				
S.N.C.+Fex5	0,00291	0,0117	0,00884	0,00536	0,00752	0,0152	0,241	0,0273				

- Le manganèse : dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive complète (S.N.C.), l'organe le plus riche en manganèse est la première feuille ; la quantité dosée est supérieure de 15,8 % à celle dosée dans les racines et de 32,2 % à celle dosée dans les jeunes feuilles. Les graines sont les moins riches comme le montrent le tableau 30 et la figure 22. Par contre, dans le cas où le manganèse se trouve en concentration cinq fois plus forte (S.N.C. + Mnx5), les racines deviennent l'organe le plus riche, 0,01913 % de la matière sèche contre 0,01609 % dans la première feuille, ce qui veut dire que la première feuille renferme moins de 18,9 % du manganèse des racines et les feuilles les plus jeunes moins de 50,2 %. Donc, nous pouvons penser que les racines accumulent la quantité supérieure aux besoins de la plante qui se trouve dans le milieu. Nous voyons également, d'après les mêmes tableau et figure que les racines accumulent le manganèse dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive complète renfermant une concentration en cuivre ou en zinc cinq fois plus forte (S.N.C. + Cux5 et S.N.C. + Znx5) et en fer trois fois plus forte (S.N.C. + Fex3). Dans tous ces traitements, les organes les moins riches sont les graines et ensuite les jeunes feuilles.

- Le cuivre : dans tous les traitements de cet essai, les racines renfermant le maximum de cuivre et la quantité trouvée dans les racines est au moins égale au double de celle des autres organes (voir tableau 30 et la figure 23). Par contre, les feuilles les plus jeunes sont l'organe le moins riche en cet élément car la première feuille que nous avons analysée à part, en pensant qu'elle est différente du point de vue de sa composition minérale des feuilles jeunes, est plus riche. L'ordre de grandeur de la différence entre les différents organes varie avec la composition du milieu nutritif, dans le cas du blé cultivé sur solution nutritive complète (S.N.C.) ; cette différence est de 157,3 % entre la première feuille et les racines, et de 412 % entre les racines et les feuilles jeunes.

D'après le tableau 30 et la figure 23, la présence d'une concentration en manganèse cinq fois plus forte (S.N.C. + Mnx5) ne fait pas varier l'assimilation du cuivre par les différents organes des plantes, et la différence entre les organes des plantes, dans ce cas, reste semblable

Mn en % de matière sèche.

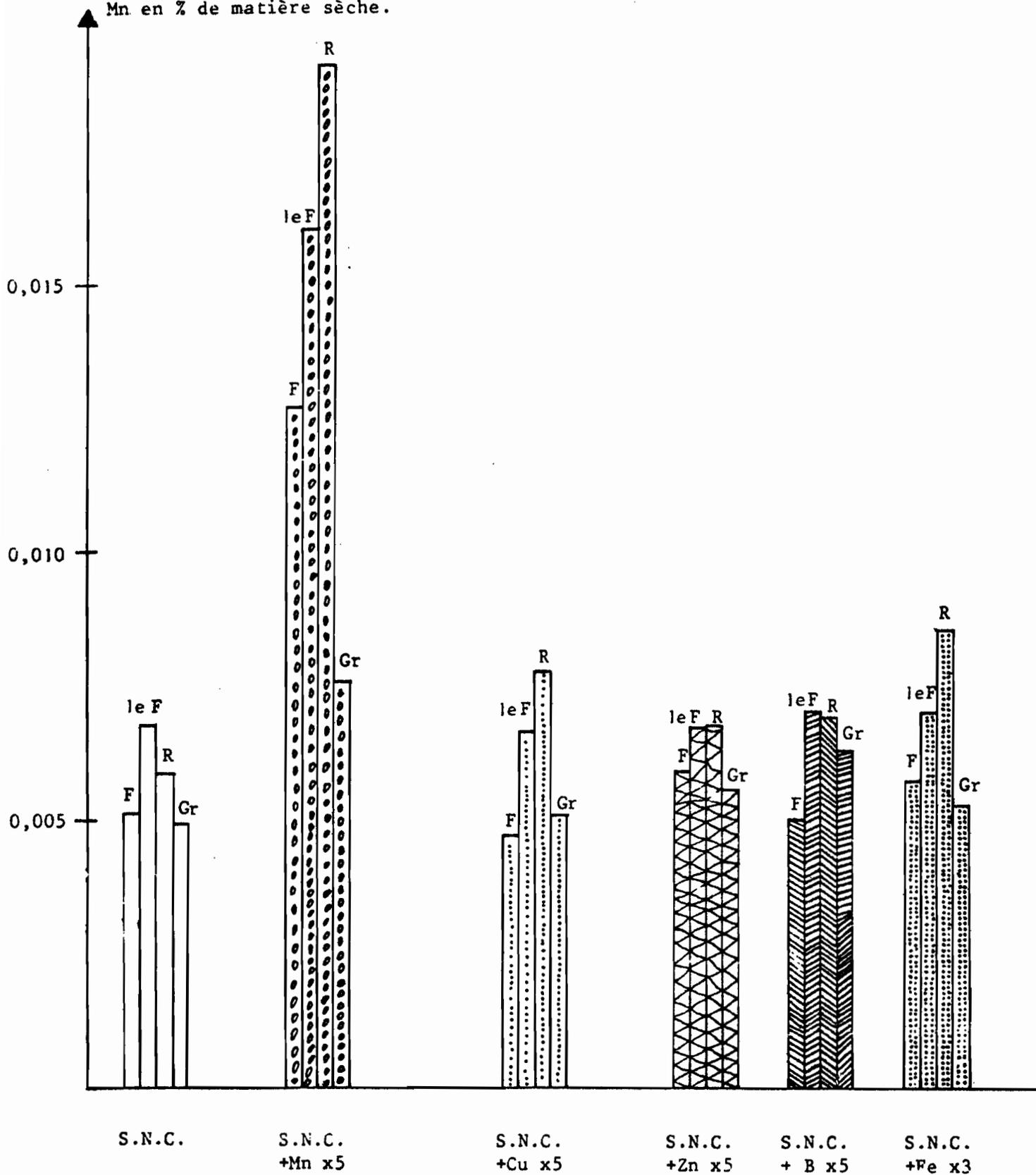


FIGURE 22 - Teneur en manganèse dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "TROISIEME ESSAI".

F : jeune feuille
 le F : première feuille
 R : racine
 Gr : graine

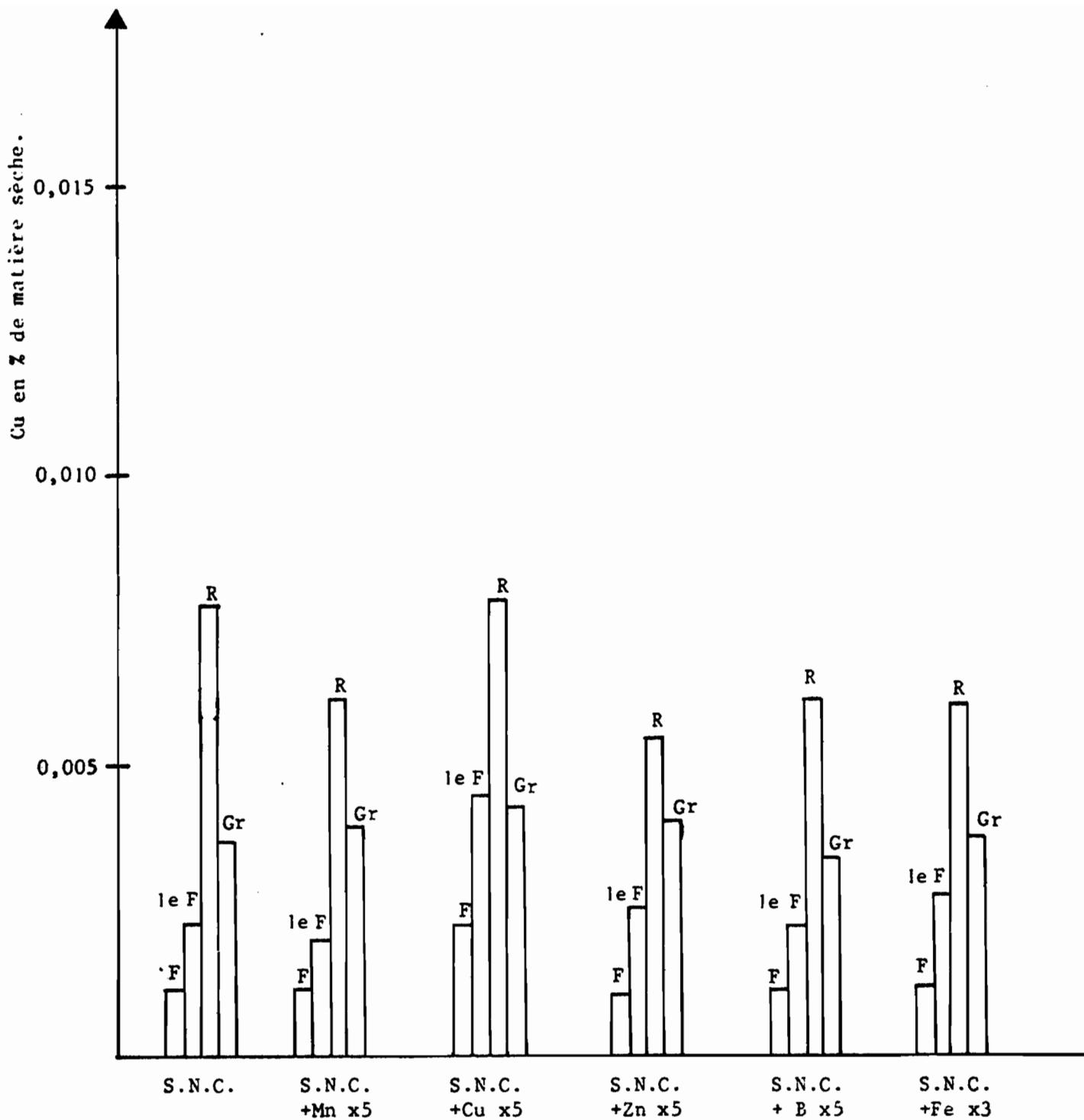


FIGURE 23 - Teneur en cuivre dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "TROISIEME ESSAI".

à celle obtenue dans le cas de solution nutritive complète. Nous pouvons, tout de même noter une baisse de 11,8 % de l'assimilation dans la première feuille en comparaison avec le cas de solution nutritive complète. Par contre, dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration en cuivre cinq fois plus forte, nous remarquons que la différence ne reste pas semblable aux autres cas ; elle est de 74,4 % entre les quantités assimilées par les racines et par la première feuille, et de 243,4 % entre les quantités assimilées par les racines et par les feuilles jeunes.

Quand la concentration de fer est triplée (S.N.C. + Fe3), la première feuille assimile davantage de cuivre (0,00281 % de la matière sèche contre 0,00227 % dans le cas où le fer est en concentration normale (S.N.C.), soit une différence de 23,8 %. Cette différence est la même dans le cas de la S.N.C. renfermant une concentration en bore cinq fois plus forte (Bx5).

Lorsque les plantes sont cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration en zinc cinq fois plus forte, d'après le tableau 30 et la figure 23, il n'existe pas de différence notable dans l'assimilation du cuivre au niveau des feuilles et des racines, mais par contre, au niveau de la première feuille, elle est de 12,8 %.

- Le zinc : comme le cuivre, cet élément est mieux absorbés, dans tous les traitements, par les racines que par les autres organes, sauf la première feuille, dans les deux cas où le manganèse et le cuivre sont en concentration cinq fois plus forte. La différence entre les quantités assimilées par les différents organes varie suivant la composition du milieu nutritif. Dans le même milieu des différences existent au niveau de chaque organe : dans le cas des plantes cultivées sur solution nutritive complète, les racines renferment une quantité de zinc supérieure de 23 % à celle de la première feuille, et supérieure de 19,6 % à celle des jeunes feuilles, tandis que la différence entre les racines et les graines est négligeable. Les organes des plantes cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration de manganèse cinq fois plus forte (S.N.C. + Mn5) présentent une richesse relative en zinc par rapport au cas de solution nutritive complète ; ainsi, par exemple, la pre-

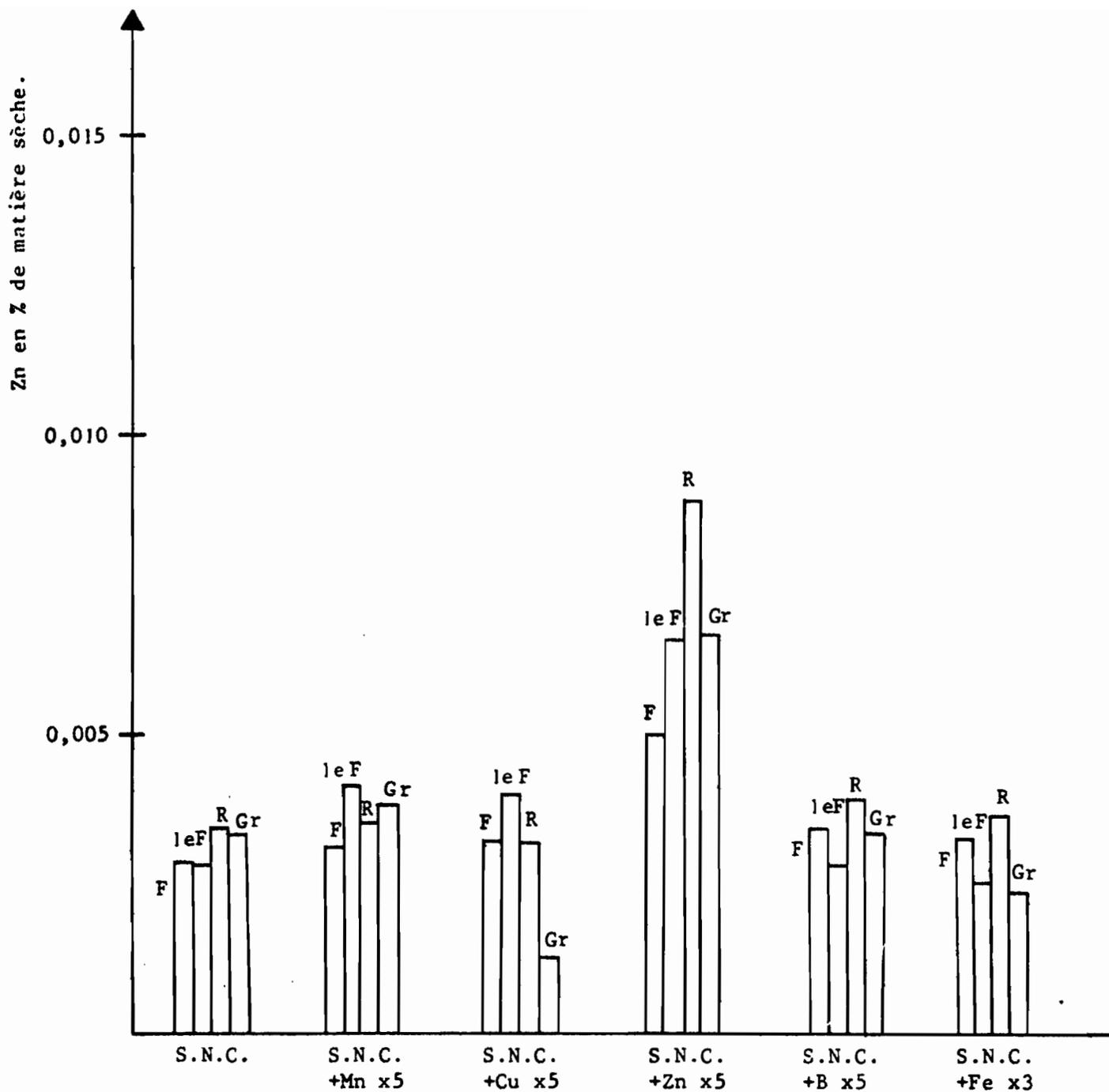


FIGURE 24 - Teneur en zinc dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "TROISIEME ESSAI".

mière feuille est plus riche de 47,7 % (voir tableau 30 et figure 24).

En présence de cuivre en concentration cinq fois plus forte (S.N.C. + Cux5), la quantité de zinc dans les graines est très faible par rapport à celle des autres organes, aussi bien dans le même traitement (figure 24). que dans les autres ; cela est très clair sur les histogrammes. Cette quantité est inférieure de 171,2 % à celle trouvée dans les graines dans le cas de solution nutritive complète. Dans les plantes cultivées sur solution nutritive complète, plus une concentration de zinc cinq fois plus forte (S.N.C. + Znx5), nous trouvons dans les racines une quantité de zinc supérieure de 35,4 % à celle assimilée par la première feuille, de 78,4 % à celle des feuilles et de 157,2 % seulement par rapport aux racines cultivées sur solution nutritive complète (S.N.C.). En outre, dans le milieu où le bore est ajouté en quantité cinq fois plus forte (S.N.C. + Bx5), l'assimilation du zinc est relativement favorisée, surtout dans les racines et les feuilles, comme nous le montrent le tableau 30 et la figure 24. Une différence de 12,6 % a été notée au niveau des racines.

Ce qui paraît important c'est que, dans le cas de la solution nutritive complète plus une concentration de fer trois fois plus forte (S.N.C. + Fex3), nous trouvons dans les jeunes feuilles une diminution de l'assimilation du zinc, malgré la présence importante de cet élément dans les jeunes feuilles et dans la première feuille ; cette diminution est respectivement de 18,3 % et 12,3 % par rapport aux quantités trouvées pour les plantes cultivées en milieu S.N.C.. Cette diminution n'a pas été remarquée pour les racines ; au contraire, il y a une légère augmentation de 6,9 % par rapport à ce que nous trouvons dans les racines des plantes cultivées sur milieu S.N.C.

- Le bore : cet élément se trouve en plus grande quantité dans la première feuille que dans les autres organes comme l'indiquent le tableau 30 et la figure 25. Les jeunes feuilles, par contre, sont pauvres en bore, surtout en présence d'une concentration en fer trois fois plus forte (S.N.C. + Fex3). La teneur en bore de la première feuille des plantes cultivées sur solution nutritive complète est supérieure de 72,7 % à celle des racines cultivées sur le même milieu, et de 240,4 % à celle des feuilles jeunes. Les histogrammes (figure 25)

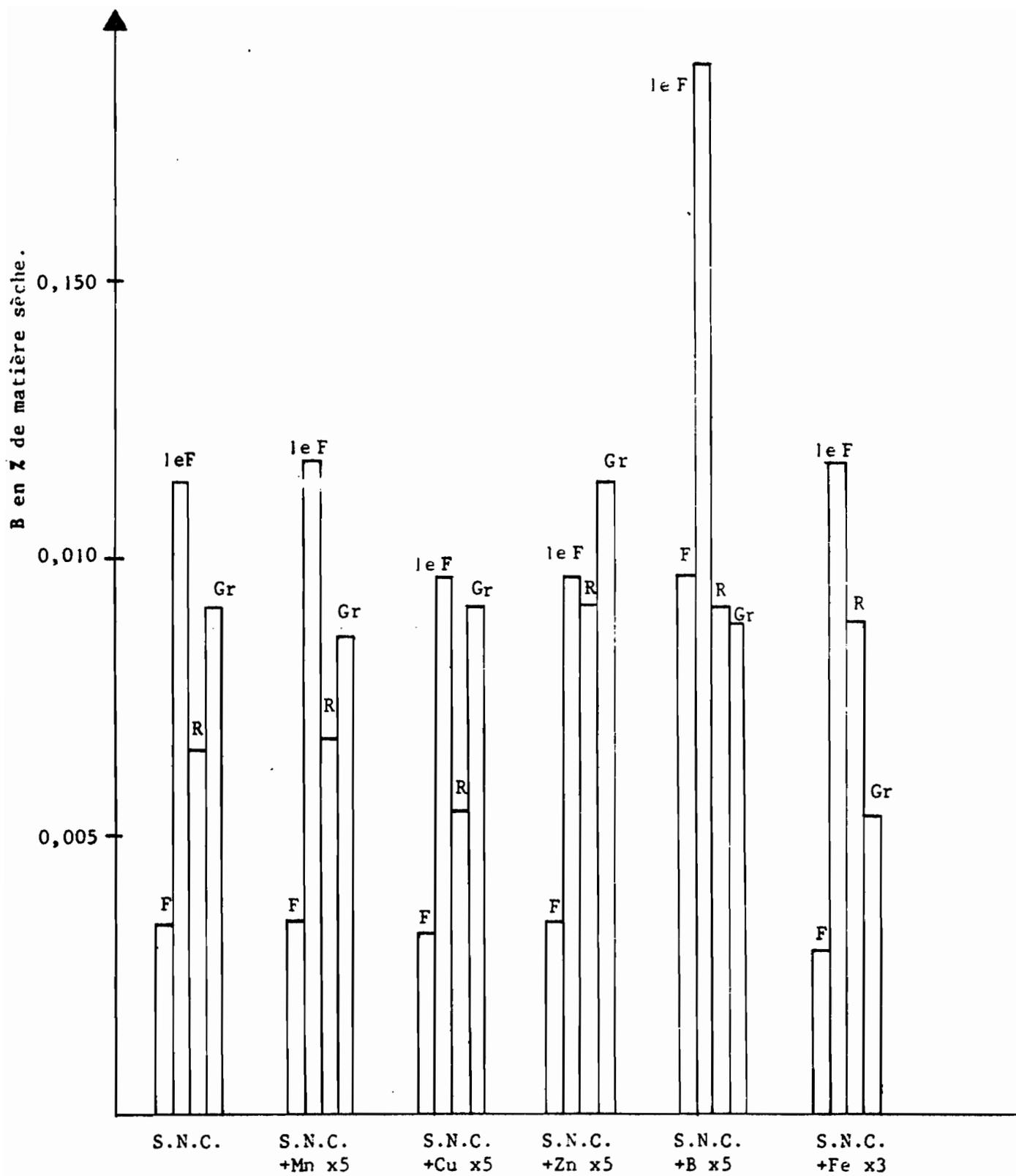


FIGURE 25 - Teneur en bore dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "TROISIEME ESSAI".

nous montre que l'assimilation du bore, par les plantes cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration de manganèse cinq fois plus forte, augmente légèrement par rapport aux plantes cultivées sur solution nutritive complète (augmentation de 6,3 % dans les feuilles et de 7,4 % dans les graines). On note une diminution de l'assimilation du bore pour les plantes cultivées en solution nutritive complète plus une concentration du cuivre cinq fois plus forte (voir figure 25) ; cette diminution est de 9,2 % dans les feuilles, de 21,8 % dans la première feuille et de 23,6 % dans les racines par rapport aux teneurs obtenues en milieu (S.N.C. + Mn5). Par contre, nous remarquons, à partir de la figure 25 et du tableau 30, que le bore s'accumule dans les racines dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive complète plus une concentration en zinc cinq fois plus forte (S.N.C. + Zn5) ; en effet, nous trouvons dans les racines une quantité supérieure de 37,1 % à celle trouvée dans les racines des plantes cultivées sur solution nutritive complète.

Pour les plantes cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration en bore cinq fois plus forte, l'augmentation en bore est égale à 188,9 % dans les feuilles, à seulement 66,6 % dans la première feuille et 37,1 % dans les racines, par rapport au bore dosé dans les mêmes organes, en milieu S.N.C. En présence de fer en concentration trois fois plus forte dans la solution, nous remarquons, d'après le tableau 30, une baisse importante de l'assimilation du bore dans les feuilles ; elle est de 14,8 % par rapport à celle en milieu S.N.C. ; par contre, dans ce même cas, les racines sont plus riches (la différence est égale à 34,3 %).

- Le fer : le tableau 30 et la figure 26 nous indiquent très nettement que, dans tous les traitements, les racines sont les organes les plus riches en fer et que la différence entre la quantité de fer existant dans les racines et dans les autres organes est très grande. En outre, nous remarquons sur ces mêmes figure et tableau que les jeunes feuilles sont pauvres par rapport aux autres organes.

Dans le cas des plants de blé cultivés sur solution nutritive complète (S.N.C.), les racines renferment 18 fois plus de fer que la première feuille et 20 fois plus que les feuilles ; par contre, dans le cas

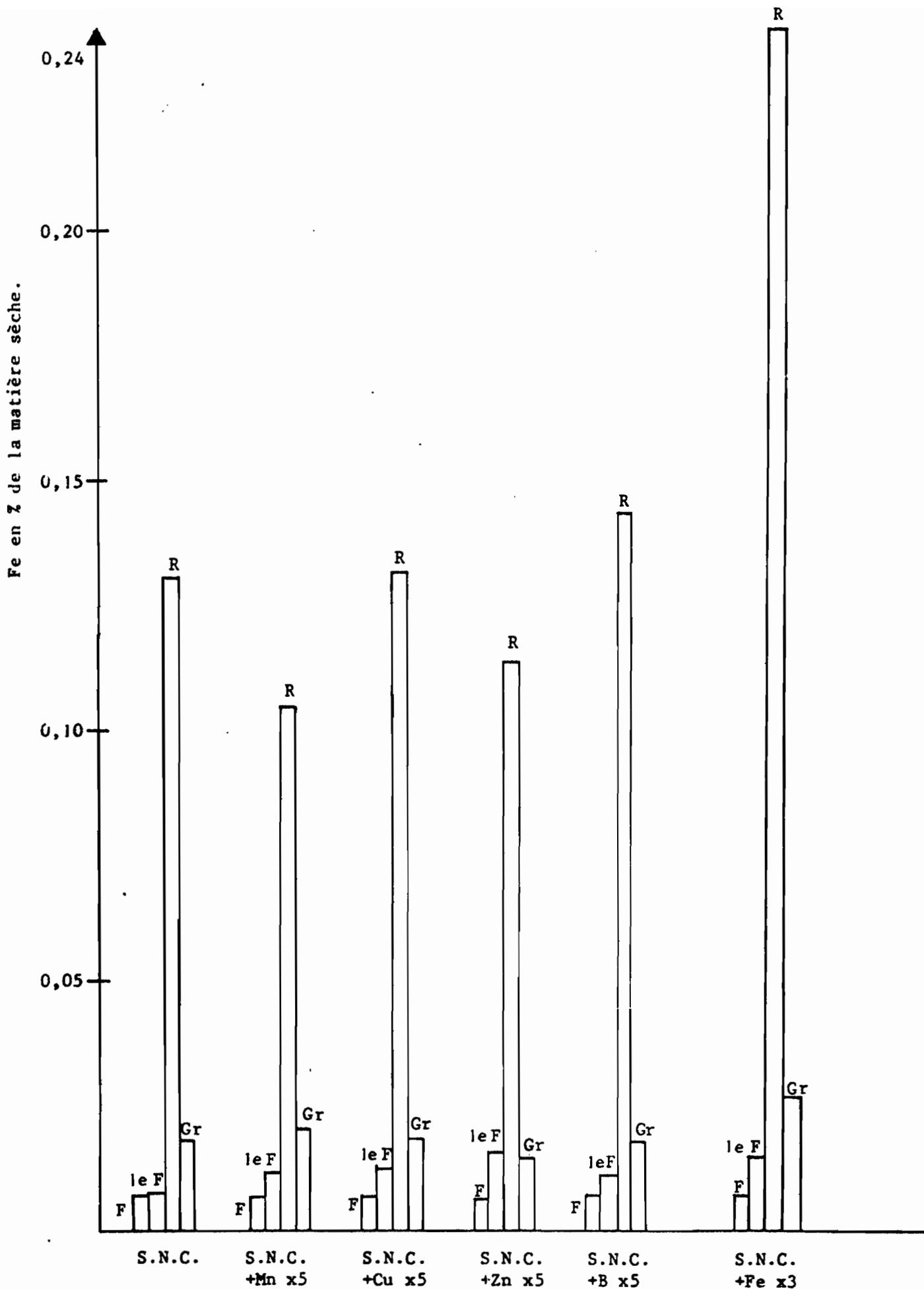


FIGURE 26 - Teneur en fer dans les différentes parties du blé en fonction du milieu nutritif. "TROISIEME ESSAI".

de la solution complète plus une concentration en manganèse cinq fois plus forte, les racines ont 24,4 % de fer en moins que dans la solution (S.N.C.) et la première feuille contient plus de fer, ce qui nous laisse supposer que le manganèse favorise la mobilisation du fer. Contrairement au manganèse, le zinc semble inhiber la translocation du fer vers les jeunes feuilles car la concentration diminue de 11 % par rapport au milieu de S.N.C. (grand nombre de travaux intérieurs ont été apportés sur ces effets de zinc et de manganèse sur le fer, voir discussion).

D'après le tableau 30 et la figure 26, les plantes cultivées sur solution nutritive complète plus une concentration en fer trois fois plus forte présentent une augmentation de la quantité de fer de seulement 84,8 % dans les racines, de 11,6 % dans la première feuille et de seulement 10,7 % dans les jeunes feuilles par rapport à celles cultivées sur solution nutritive complète (S.N.C.).

6.3. CONCLUSION.

Le dosage des oligo-éléments ayant pour but d'étudier leur assimilabilité par les différents organes des plantes et leur possibilité de s'accumuler plus dans un organe que dans un autre, les deux premiers essais ont abouti aux résultats suivants.

- Dans tous les traitements le cuivre s'accumule nettement dans les racines tandis que les feuilles en assimilent la moins forte quantité.
- Le manganèse, dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive complète, est nettement mieux assimilé par les feuilles que par les racines, par rapport au cas des plantes cultivées en solution nutritive des macro-éléments où le manganèse, venant essentiellement des graines, est assimilé relativement mieux par les feuilles que par les racines.

- Le zinc est moins assimilé que les autres oligo-éléments mais, d'autre part, il est mieux assimilé par les gaines que par les autres organes.
- Le bore s'accumule dans les racines ; il est assimilé d'une façon presque semblable par les feuilles et les gaines.
- Le fer est plus absorbé par les plantes que les autres oligo-éléments. Il s'accumule dans les racines tandis que les feuilles sont les moins riches en cet élément.
- Pendant la germination, les plantes n'absorbent pas tous les oligo-éléments que les graines renferment.

Le troisième essai nous permet de conclure

- Il est très difficile à la plante de s'enrichir en oligo-éléments d'une façon proportionnelle à l'augmentation de leur concentration dans le milieu ;
- Dans le cas de la solution nutritive complète, la première feuille assimile la plus forte quantité de manganèse, tandis que dans tous les autres traitements de cet essai cet élément s'accumule dans les racines ;
- Dans tous les traitements, le cuivre s'accumule dans les racines et les jeunes feuilles sont les organes les moins riches en cet élément. En présence d'une concentration en fer trois fois plus forte ou en bore cinq fois plus forte, la première feuille assimile plus de cuivre que dans les autres traitements ; par contre, la différence d'assimilation entre les jeunes feuilles et les racines diminue beaucoup en présence d'une concentration en zinc cinq fois plus forte ;
- A l'exception des deux traitements où le manganèse et le cuivre sont en concentration cinq fois plus forte, les racines accumulent plus de zinc que les autres organes. Dans ces deux traitements, c'est la première feuille qui assimile le plus de zinc. Ainsi, tous les organes des plantes cultivées sur solution renfermant une concentration en manganèse cinq fois plus forte, présentent une richesse relative en zinc par rapport au cas de la solution nutritive complète. Les graines sont très pauvres en zinc dans le cas d'une concentration en cuivre cinq fois plus forte.
- En présence d'une concentration en fer trois fois plus forte, l'assimilation du zinc dans les jeunes feuilles est beaucoup moins im-

portante que dans le cas de la solution nutritive complète ; par contre, elle augmente légèrement dans les racines.

- Le bore se trouve en plus grande quantité dans la première feuille, dans tous les traitements, sauf dans le cas d'une concentration en zinc cinq fois plus forte où il s'accumule dans les racines. En outre, son assimilation diminue en présence d'une concentration en cuivre cinq fois plus forte.
- Dans tous les traitements, le fer est très nettement accumulé dans les racines ; par contre, les jeunes feuilles sont les moins riches en cet élément.
- Contrairement au manganèse, le zinc semble inhiber la migration du fer vers les jeunes feuilles.

7. CORRELATION DANS LES SOLUTIONS NUTRITIVES ENTRE LES TAUX EN MACRO ET MICRO-ELEMENTS.

Pour mieux montrer l'influence de la présence d'un élément sur l'absorption d'un autre élément existant dans le même milieu, nous avons jugé utile de calculer, à partir de la covariance

$$(S_{xy} = \frac{1}{n-1} (\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i))$$

et de l'écart-type

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}}$$

de deux éléments, les coefficients de corrélation

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

S_{xy} : covariance de xy.

S_x : écart-type des données x.

S_y : écart-type des données y.

Le tableau 31.A nous montre les coefficients de corrélation entre les éléments majeurs et les oligo-éléments présents dans la solution nutritive complète du premier essai. Dans le tableau 31.B nous trouvons les corrélations entre les éléments majeurs dans le cas de la solution nutritive de macro-éléments (S.N.M.).

Ces deux tableaux nous montrent que, dans la majeure partie des cas que nous avons traités dans les deux premiers essais, des corrélations significatives existent entre les éléments et surtout entre le potassium et les autres éléments. Ces corrélations sont confirmées par le deuxième essai.

Dans le troisième essai nous avons également calculé les coefficients de corrélation pour chaque traitement ; ces coefficients sont présentés dans le tableau 32. Ces corrélations sont toujours positives dans le cas de la solution nutritive complète ; elles sont significatives dans la plupart des cas tandis qu'elles sont négativement significatives entre le zinc et le fer dans le cas de la solution contenant une concentration en zinc cinq fois plus forte (S.N.C. + Zn x 5), négative entre le manganèse et le fer dans le cas de la solution nutritive complète plus une concentration de manganèse cinq fois plus forte ; de même, lorsque la solution nutritive complète renferme une concentration en fer trois fois plus forte (S.N.C. + Fe x 3), des corrélations négativement significatives existent entre le fer et le manganèse, le fer et le zinc : cela signifie que l'absorption du fer est gênée par la présence du manganèse et du zinc en concentration forte.

TABLEAU 31.A - Corrélation entre les éléments majeurs et les oligo-éléments dans les solutions nutritives complètes du premier essai.

	Mg	K	PO ₄	Cu	Mn	Zn	B	Fe
Ca	0,78	0,94	-0,21	-0,24	0,29	0,49	0,85	0,60
Mg		0,79	-0,23	0,822	0,85	0,733	0,906	-0,258
K			0,803	0,897	0,63	0,816	0,915	0,849
PO ₄				0,51	0,95	0,959	0,709	0,909
Cu					0,76	0,49	0,827	0,696
Mn						0,76	0,833	0,910
Zn							0,70	0,772
B								0,834

TABLEAU 31.B - Corrélation entre les éléments majeurs dans les solutions nutritives des macro-éléments (S.N.M.) du premier essai.

	Mg	K	PO ₄
Ca	0,67	0,81	-0,44
Mg		0,78	0,29
K			0,95
PO ₄			

Le seuil de signification est de 0,6664 au risque de 5 %.

TABLEAU 32 - Corrélation entre oligo-éléments en concentration différente dans les solutions nutritives.

Solution nutritive complète

	Mn	Zn	B	Fe
Cu	0,69	0,40	0,82	0,80
Mn		0,67	0,74	0,70
Zn			0,94	0,54
B				0,96
<p>Traitement en solution nutritive complète plus une concentration en bore cinq fois plus forte.</p>				
Cu	0,863	0,886	0,471	0,85
Mn		0,68	0,671	0,784
Zn			0,130	0,667
B				0,855
<p>Solution nutritive complète plus une concentration en manganèse cinq fois plus forte.</p>				
Cu	0,695	0,835	0,844	0,752
Mn		0,647	0,593	-0,406
Zn			0,609	0,483
B				0,583
<p>Solution nutritive complète plus une concentration en fer trois fois plus forte.</p>				
Cu	0,634	0,923	0,927	0,925
Mn		0,846	0,811	-0,832
Zn			0,80	-0,734
B				0,920

TABLEAU 32 - Suite.

Solution nutritive complète plus une concentration en zinc cinq fois plus forte.

	Mn	Zn	B	Fe
Cu	0,55	0,88	0,119	0,856
Mn		0,915	0,925	0,939
Zn			-0,122	-0,948
B				0,929
Solution nutritive complète plus une concentration en cuivre cinq fois plus forte.				
Cu	0,83	0,79	0,96	0,93
Mn		0,83	0,94	0,97
Zn			0,42	-0,26
B				0,97

Le seuil de signification est de 0,7067 au risque de 5 %

Chapitre III.

DISCUSSION.

1. INFLUENCE DES DOSES D'OLIGO-ELEMENTS SUR L'ASPECT MORPHOLOGIQUE DU BLE.

Nos essais de culture de blé sur solutions nutritives synthétiques ayant des concentrations variables en oligo-éléments nous ont montré l'effet de ces oligo-éléments sur l'aspect extérieur des plantes lorsqu'on les ajoute ou non aux solutions nutritives. Pour les deux premiers essais nous avons pu observer que le blé a un développement semblable pendant la première semaine, puis le développement et la croissance commencent à différer : les plants de blé se développent plus rapidement dans le traitement avec oligo-éléments; à la fin de l'essai, ils atteignent une hauteur plus grande que dans le traitement sans oligo-éléments; en outre, en présence d'oligo-éléments, les plantes gardent leur aspect sain et normal alors que dans le cas où ils ne sont pas ajoutés dans le milieu, les plantes sont plus courtes et leur aspect montre que leur croissance est inhibée. Ainsi, nous avons trouvé que le blé est sensible à une déficience en cuivre car il a présenté des symptômes de carence (décoloration des feuilles jusqu'à teinte blanche) ; ce phénomène a déjà été constaté par plusieurs auteurs (TOMS, 1958 ; SMILDE et al., 1967 ; COPPENET, 1968 et RAULIN, 1979).

BROWN et al. (1977) ont constaté un développement semblable à celui que nous avons observé ; ils ont, ainsi, montré que la différence entre les hauteurs des plants de blé cultivés en milieu nutritif sans cuivre et ceux cultivés en milieu contenant suffisamment de cuivre ne dépasse pas 3,6 cm pendant les 23 premiers jours de l'essai.

En outre, la sensibilité du blé à l'excès en cuivre (concentration cinq fois plus forte que la concentration estimée suffisante), mise en évidence dans nos résultats du troisième essai, a été bien étudiée ; elle est même considérée par SMILDE et al. (1967) comme un exemple très représentatif.

Dès 1950, BURSTRÖM a remarqué que les racines ne se développent pas régulièrement sans le manganèse ; nous avons pu remarquer ce phénomène sur les racines du blé dans nos deux premiers essais. D'après STEWARD (1963), l'effet visible de la carence en manganèse est plus diversifié que celui de plusieurs autres oligo-éléments. Il apparaît sur les premières feuilles comme nous l'avons observé. Cependant, certains auteurs ont trouvé que ces symptômes se manifestent, non pas par des taches brunes longitudinales comme dans cette étude, mais par des rayures blanches nécrotiques entre les nervures de la feuille (WALLACE, 1961) ; mais, sachant que la carence en manganèse sensibilise les plantes aux infections bactériennes (HELLER, 1977), nous ne pouvons pas affirmer que ces symptômes ne proviennent pas d'infections bactériennes. Par contre, nous avons montré que le blé n'est pas sensible à l'excès de manganèse.

Le rôle du bore, remarqué dans ce travail, sur les apêx des organes et en particulier les feuilles, a déjà été confirmé par plusieurs auteurs. Il est d'ailleurs lié au fait que le bore est associé à l'activité méristématique et à la division cellulaire (SILLANPÄÄ, 1972). Son influence est surtout constatée à travers les différentes études sur les organes (apêx, racines, tissus vasculaires des feuilles, ...) où l'activité métabolique et méristématique sont intensives ; d'après HEWITT (1963), cet effet est dû à une tendance du bore à s'accumuler dans les tissus mûrs, ce qui fait que les apêx sont déficients en bore ; nous pensons que cette déficience se manifeste

par des troubles dans le fonctionnement des méristèmes et la différenciation des organes.

NAMBIAR (1976), en étudiant la différence importante de sensibilité entre le blé et le seigle (*Secale cereale*), a signalé l'effet toxique du zinc à partir d'une concentration de 0,2 ppm dans le milieu nutritif. Cette étude n'a montré, avec cette concentration, aucun symptôme de toxicité sur le blé ; nous relierions cela au fait que le zinc s'accumule dans les racines qui réduisent sa migration vers les parties aériennes.

D'autre part, on n'a pas constaté de symptômes de carence quand il n'y a pas de zinc dans la solution ; cela et le fait d'avoir un développement analogue du blé des deux premiers essais, malgré la composition minérale différente du milieu, est dû à l'existence dans les graines de ressources alimentaires qui fournissent à la plante tous les éléments essentiels à la première période du développement (STEWART, 1963). Egalement, HELLER (1977), signale que les plantules sont riches en éléments minéraux du fait des réserves venues des graines.

Cette source peut être mise en évidence même dans les essais ayant pour but de produire une carence ou de prouver le besoin en un élément dont on n'a pas encore déterminé la quantité nécessaire à une croissance normale de la plante. Ainsi, l'importance de cette réserve en éléments minéraux dans les graines a été nettement montrée dans les essais faits par HEWITT et al. (1954).

2. INFLUENCE DES OLIGO-ELEMENTS SUR LA PRODUCTION DE MATIERE VEGETALE.

Malgré la courte période de nos essais, pour les deux premiers, nous avons pu constater dans la production de matière sèche une baisse égale respectivement à 8,4 % et 8,6 % dans le cas où les plantes ont été cultivées en absence d'oligo-éléments (voir tableaux 17 et 18, chapitre II-3). Ces diminutions relativement faibles montrent que

dans ces essais de courte période, la production de matière sèche n'est que peu influencée par la carence en oligo-éléments ; cela peut avoir des applications très importantes dans la culture du blé dans les sols relativement pauvres en oligo-éléments. Nous rejoignons, ici, ce que VAN EGMOND et al. (1977), ont trouvé : 6 % de différence. Il est utile de rappeler que pour d'autres espèces, les résultats ne sont pas les mêmes (BROWN et al., 1977). Ainsi, ces mêmes auteurs ont trouvé que, dans le cas du blé cultivé en milieu déficient en cuivre, la différence dans la production de la matière sèche, après 38 jours d'expérience, varie d'un organe à l'autre, comme nous l'avons montré et que la différence absolue augmente en fonction du temps.

Quand les concentrations en oligo-éléments augmentent dans le milieu nutritif, leur influence varie en fonction de la sensibilité du blé à chacun d'entre eux car le blé, comme toutes les autres plantes, peut être sensible à un oligo-élément et moins sensible à un autre, suivant le rôle de l'élément qui peut être spécifique (il est partie intégrante de l'enzyme) ou simplement activateur d'enzyme et remplaçable par un autre oligo-élément (COÏC et al., 1975). Ainsi, nous avons trouvé que le blé est sensible à l'augmentation de la teneur en fer dans la solution car la baisse la plus grande dans la production de matière sèche a été notée dans ce cas là. Le blé se montre également sensible à un taux de cuivre cinq fois plus fort (voir tableau 19). Cette constatation, pour ces deux éléments, correspond à leur rôle important dans le métabolisme chez le blé ; elle est d'ailleurs en bon accord avec les résultats obtenus sur ray-grass par COTTENIE et al. (1973). Par contre, pour certains auteurs, la différence de sensibilité à l'excès d'un oligo-élément, tient davantage à la plus grande vitesse d'accumulation dans les feuilles ; EHLIG (1960) l'a bien montré pour le chlore et OERTLI et al. (1961) pour le bore. Notre étude a aussi montré ce phénomène pour le bore mais non pour le cuivre et le fer (voir tableau 30). Notre troisième essai a bien montré la baisse minimale de matière sèche notée dans le cas d'un excès en bore ; nous rejoignons OERTLI et al. (1961) qui ont expliqué la raison pour laquelle la production de matière végétale ne baisse pas beaucoup malgré l'apparition sur la plante de symptômes

de carence ; ils pensaient que le bore s'accumule dans une partie des feuilles. Par conséquent, même si ces feuilles meurent, la photosynthèse ne se réduit que partiellement et c'est le poids des feuilles qui baisse davantage, comme cette étude l'a prouvé (voir tableau 19). En outre, SCOTT (1960) a signalé que le taux de respiration des feuilles, contenant une concentration élevée en bore, est quelque peu plus élevé que celui des feuilles qui en contiennent moins ; mais la différence n'est pas suffisante pour provoquer beaucoup d'anomalies dans la photosynthèse.

D'autre part, MASK et al. (1978) ont trouvé que le poids de la matière sèche de soja n'augmente que de 11,4 à 11,9 g pendant les 27 premiers jours lorsqu'ils ont augmenté la concentration du manganèse de 0 à 2,5 µg/g dans le milieu. Nous avons trouvé que les feuilles sont les organes les plus influencés par l'excès de manganèse ; cette action du manganèse correspond, en fait, à son accumulation dans les feuilles comme on le voit sur le tableau 30. HEWITT (1963) a d'ailleurs indiqué que l'influence de l'excès de manganèse est, en partie, liée à l'assimilabilité relative de cet élément ; d'autre part, nos résultats vont dans le même sens que ceux trouvés par BENAC (1976) en ce qui concerne la migration très large du manganèse vers les feuilles pour s'y accumuler. SINGLE (1958) a noté que les feuilles de blé gardent tout ou la majeure partie de leur manganèse.

Le zinc est plus important pour la floraison et la production des graines et l'augmentation de la concentration en zinc de 0,05 à 0,15 ppm, dans la solution nutritive, diminue légèrement la production de matière sèche du trèfle (*Trifolium subterraneum*) (RICEMAN et al., 1958). Nous même avons trouvé que l'augmentation du zinc, de 0,05 à 0,25 ppm, dans la solution nutritive, diminue légèrement (3,3 %) la production de matière sèche et, par ailleurs, dans des conditions non salées (0 mM) ; SAEEDBHATTI et al. (1977) ont prouvé qu'une concentration élevée en zinc diminue légèrement la production de matière sèche du maïs mais que l'absence de zinc fait davantage baisser cette production qu'une concentration élevée.

3. EVOLUTION DE L'ABSORPTION DES ELEMENTS NUTRITIFS.

Dans la majeure partie des travaux antérieurs, le contrôle de l'évolution de l'absorption des éléments nutritifs que nous estimons très important au point de vue pratique dans le domaine de la fertilisation et de la nutrition minérale des plantes, a été très peu étudié. Afin d'aborder cette étude, nous avons effectué l'analyse des solutions nutritives.

3.1. En fonction du temps.

Les concentrations des éléments nutritifs contenus dans les solutions diminuent en général en fonction du temps ; d'ailleurs, notre étude a pour but d'étudier les besoins du blé durant les premiers stades du développement. Peu d'études ont été faites sur ces besoins durant ces stades qui sont d'une grande importance pour les stades suivants du développement du blé. Comme notre travail le montre, cette évolution de l'absorption des éléments n'est pas la même pour toutes les périodes des essais ; nous avons constaté qu'elle est maximale pendant la première semaine et qu'elle dépend des différents stades de croissance et de développement qui sont maxima pendant cette même période, comme l'ont montré nos résultats. Nous avons d'autre part montré que la plante, à un moment donné de sa croissance, demande davantage d'un ou plusieurs éléments, ce que nous estimons intéressant quand on fait le bilan nutritionnel du blé tout au long de son cycle.

RAM (1980) a trouvé que la capacité d'échange des racines du blé est au maximum dans la première période de croissance et que l'assimilabilité du phosphore, du potassium, du fer et du manganèse, dans les différents organes, est en corrélation significative et positive avec cette capacité d'échange des racines. SANCHEZ et al. (1979), analysant les solutions nutritives au cours d'essais sur le maïs hybride, ont trouvé que l'absorption maximale a eu lieu pendant la première semaine des essais et, d'ailleurs, à partir du septième jour, ils ont augmenté de moitié les concentrations des éléments nutritifs afin de ne pas déséquilibrer le milieu.

En ce qui concerne le potassium, nous avons constaté une baisse dans le milieu de 58,6 à 56,4 ppm (voir tableau 20) pour la première semaine, tandis que SANCHEZ et al. (1979) ont trouvé, pour la même période, une diminution de 53 ppm. Pour le calcium, nous avons également trouvé qu'il n'y a pratiquement pas de différence dans l'évolution de son absorption d'une période à l'autre. Pour le magnésium, l'absorption, pendant la première semaine, de 7,1 à 13,4 ppm pour nous, et de 14,4 ppm pour SANCHEZ, n'a pas eu d'incidence sur les plantes.

Nos résultats sur le manganèse et le zinc sont analogues à ceux de SANCHEZ et al. (1979) qui ont trouvé que le manganèse, mis à part la première semaine pendant laquelle la diminution de sa concentration dans la solution est maximale, diminue d'une façon presque semblable tout au long de l'essai.

Dans notre cas, la diminution de la concentration est minimale pendant la dernière semaine, tandis que l'absorption du zinc reste pratiquement stable à partir de la deuxième semaine, avec une légère augmentation vers la fin de l'essai. LINDSAY (1972) a signalé qu'en général les très jeunes plantes sont les plus riches en zinc et que la concentration de cet élément diminue avec l'âge ; il a, par ailleurs, lié cela à l'épuisement du zinc de la solution nutritive. Cela est en concordance avec nos résultats.

Alors qu'elle a été signalée par DECKOCK et al. (1960), dans le cas où le fer est ajouté sous forme de FeCl_3 , notre étude n'a pas mis en évidence la précipitation du phosphore due au fer en excès ; cela est peut-être dû au fait que le fer a été ajouté dans nos essais sous forme d'EDTA qui le maintient en solution. En outre, le coefficient de corrélation entre le fer et le phosphore est, comme l'a trouvé aussi ALVAREZ-TINAUT et al. (1980), positif et significatif (voir tableau des coefficients de corrélation 31.A).

En outre, l'évolution de l'absorption du fer des solutions nutritives complètes et de macro-éléments est semblable pour chaque période des essais, ce qui peut signifier que la présence des autres oligo-éléments, à un taux nécessaire à un développement parfait du blé, n'a pas eu d'effet négatif sur l'absorption du fer.

Notre étude nous a bien montré que, non seulement le fer n'avait pas d'influence négative sur l'absorption du phosphore, mais aussi le manganèse, le zinc et le cuivre qui ont même une influence positive sur l'absorption du phosphore, car il était mieux absorbé en leur présence qu'en leur absence dans le milieu. Ce résultat important doit, en fait, être approfondi davantage surtout du point de vue physiologique et nutritionnel.

L'analyse statistique et le contrôle de la justesse du dosage prouvent bien cet effet positif sur l'absorption du phosphore.

3.2. En fonction de la croissance des plantes.

Dans notre étude, les deux premiers essais ont bien montré les besoins des plantes en oligo-éléments en fonction de leur croissance ; à l'exception du cuivre, ces besoins sont plus forts pendant la première période des essais qui correspond à une intense activité physiologique des plantes. La courbe des besoins correspond à celle de la croissance.

WOODRUFF, en 1979, a montré que le soja absorbe plus de bore pendant la première période de la croissance ; HAQUE et al. (1975) ont trouvé que le riz absorbe plus de zinc, de cuivre, de manganèse et de fer pendant les trente premiers jours qu'au cours des 60 jours suivants. De même, GORSLIN et al. (1965) ont noté que l'assimilabilité du bore et du zinc varie avec le stade de la croissance ; ils ont montré que le bore est mieux absorbé pendant la première période où la croissance est importante et qu'ensuite l'absorption diminue. Pour les autres périodes des essais, l'absorption des oligo-éléments des solutions diminue mais cette diminution varie d'un élément à l'autre, ce qui peut être en liaison avec les interférences entre les ions métalliques, facteurs importants affectant l'assimilabilité des éléments nutritifs (PANDEY et al., 1979). Cette absorption est également en relation avec l'activité enzymatique, surtout pour les oligo-éléments qui jouent un grand rôle comme plusieurs auteurs (HEWITT, 1963 ; MAYNARD, 1979 ; BROWN, 1979 ...) l'ont montré. Le pH joue un rôle important s'il varie

beaucoup en cours d'essai ; dans nos essais, il a été maintenu à une valeur convenable pour une bonne croissance en culture hydroponique (5,0 à 5,1).

4. REPARTITION DES OLIGO-ELEMENTS DANS LES DIFFERENTS ORGANES DE LA PLANTE.

En fait, l'analyse des tissus qui permet de déterminer la répartition des éléments minéraux dans les différents organes de la plante, n'est pas un procédé nouveau ; nous devons noter que VON LIEBIG, en 1840, l'a utilisée pour déterminer les besoins alimentaires des plantes. Cependant, la valeur de cette technique n'a été reconnue que récemment, grâce au développement des méthodes physico-chimiques. Cette technique est actuellement très utilisée pour étudier, en plus de la détermination des besoins alimentaires, l'assimilabilité des éléments nutritifs dans les différentes parties des plantes et pour connaître l'influence des concentrations du milieu en éléments nutritifs sur la quantité accumulée.

Cependant, notre objectif présent n'a pu être réalisé qu'après mise au point d'une nouvelle méthode microanalytique appliquée à de très faibles quantités de matière sèche. Cette méthode nous a permis d'effectuer un microdosage des cinq oligo-éléments étudiés et de certains éléments majeurs sur des échantillons qui, souvent, ne dépassaient pas quelques milligrammes. La justesse et la reproductibilité ont été vérifiées sur des échantillons étalons du Comité Inter-Instituts (C.I.I.) (voir 2.5. Matériels et méthodes).

L'analyse chimique a mis en évidence une différence très nette de répartition des oligo-éléments entre les différents organes des plantes, différence qui existe également pour les éléments majeurs dosés dans les deux premiers essais. D'ailleurs, CLARK, en 1978, a montré que la concentration de calcium est plus forte dans les parties aériennes du maïs que dans les racines. Nous avons pu constater le même phénomène. Il en est de même pour le magnésium et le potassium. Pour ces trois

éléments nutritifs, la concentration dans la plante décroît du potassium, au calcium et au magnésium.

La répartition des oligo-éléments dans les différents organes des plantes a été étudiée en fonction de leurs concentrations dans le milieu de culture.

4.1. Présence de concentrations nécessaires et suffisantes en oligo-éléments dans le milieu.

Dans ce cas, nous discutons la répartition des oligo-éléments et leur comportement dans les différents organes du blé.

Ce travail a montré que le manganèse ne s'accumule pas dans les racines mais migre plus vers les gaines que vers les feuilles, ceci est, en fait, en corrélation avec la mobilité du manganèse vers les parties aériennes dans les premiers stades du développement, ce qui n'est pas évident pour les stades suivants car la première feuille, comme nous l'a montré le troisième essai, retient plus de manganèse que les feuilles plus jeunes. SINGLE (1958) avait signalé que les premières feuilles reçoivent suffisamment de manganèse qui n'est pas redistribué dans les feuilles plus jeunes. BARTUSH et al. (1980) ont trouvé aussi que les feuilles de *Bitula nigra* contiennent plus de calcium, de magnésium et de manganèse que les racines : d'autre part, ce travail nous a montré que la présence des oligo-éléments, à un taux normal et suffisant, a une influence favorable sur l'absorption et la concentration des éléments majeurs dosés dans le blé (voir tableau 28 et 29). Leur accroissement varie entre 8 et 17 % ; cette influence se manifeste sur l'absorption des éléments majeurs ainsi que sur leur migration vers les autres organes.

En ce qui concerne le cuivre, nos résultats ont montré nettement que, dans tous les cas, les racines accumulent le cuivre en plus grande quantité que les autres organes et que les feuilles en accumulent le moins, ce qui est intéressant pour la valeur nutritionnelle de la paille pour le bétail. Ce résultat est constaté par la plupart des auteurs intéressés par cette question (COÏC et al., 1974 ; CLARK, 1978 ; REHAB et al., 1978 ...).

Nous avons montré que le zinc, à un taux suffisant (0,05 ppm), est peu accumulé dans les gaines et que, par rapport aux autres oligo-éléments, il se trouve en quantité relativement faible dans tous les organes. Nous pouvons donc dire que le zinc est un élément peu mobile vers les feuilles lorsqu'il se trouve en quantité juste suffisante pour les besoins de la plante. Cela confirme l'observation récemment faite sur le maïs par PEASLEE et al. (1980), et ce que ISARANGKURA et al. (1978) ont noté sur la migration limitée du zinc dans les stades végétatifs du maïs.

TIFFIN (1972) a signalé que le bore est très rapidement transporté des racines aux parties aériennes mais, quand il arrive aux feuilles, il devient l'un des oligo-éléments les moins mobiles. OERTLI et al., en 1970, ont décrit l'immobilité du bore en ces termes "*le mouvement cyclique localisé*" "*localized cyclic movement*" qui empêche l'évasion de l'élément et son transport. Nous même avons trouvé que le bore migre rapidement vers la première feuille mais à partir de cette feuille il se déplace très peu vers les feuilles jeunes. Lorsque l'on connaît l'importance du bore pour maintenir la croissance apicale et pour la division cellulaire, on peut prévoir la nécessité de s'intéresser à ce résultat. WOODRUFF (1979) a montré que les feuilles contiennent moins de bore que les graines ; nos résultats l'ont confirmé.

Le fer, comme l'analyse le montre, s'accumule d'une façon nette dans les racines par rapport aux autres organes. La proportion du fer transportée vers les parties aériennes ne représente, en aucun cas, plus de 1/6ème du fer présent dans les racines ; cette faible migration souligne l'intérêt d'une fertilisation en fer pour la culture du blé. Il convient d'approfondir l'étude de ces résultats, d'autant plus que les graines sont pauvres en fer par rapport aux racines. BROWN et al. (1970) ont trouvé aussi que le fer s'accumule dans les racines du maïs et ils ont pensé que la carence en fer vient d'un changement métabolique dans la plante qui altère l'environnement des racines en faveur de la sorption et, par conséquent, le transport du fer.

4.2. Présence d'oligo-éléments en excès dans le milieu.

La présence d'un oligo-élément à des doses excessives dans le milieu se répercute, non seulement, sur l'absorption de cet élément lui-même mais souvent aussi sur celles 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.

D'une façon générale, nous avons pu constater que l'enrichissement du blé en oligo-élément n'est pas proportionnel à l'augmentation de leur concentration dans le milieu. COÏC et al. (1974) l'avaient déjà signalé pour le cuivre dans les plantes fourragères, ainsi que MASK et al. (1978) pour le manganèse dans le soja. Nous même avons montré, qu'en présence d'une concentration en manganèse cinq fois plus forte dans le milieu, la quantité de cet élément n'augmente, dans le meilleur des cas, que de trois fois (cas de la quantité fixée dans les racines). D'ailleurs, lorsqu'il se trouve en concentration cinq fois plus forte (2,485 ppm), le manganèse s'accumule dans les racines : ALVAREZ-TINAUT et al. (1980) l'ont noté également. Nous pensons que cette accumulation est la raison pour laquelle on n'a pas constaté de symptômes de toxicité, même avec des concentrations plus fortes ; cela pourrait être un moyen de résistance du blé à la toxicité manganique. OHKI (1976) n'a pas trouvé de symptômes sur le soja qu'il a considéré, cependant, comme étant très sensible à la toxicité en manganèse ; il a lié cela à l'accumulation de cet élément dans les racines. Contrairement à ce que cette étude et OHKI (1976) ont pu noter, MASK et al. (1978) ont trouvé que les jeunes feuilles accumulent plus de manganèse que les feuilles plus âgées. Ils ont constaté, également, que l'augmentation de la concentration des jeunes feuilles en manganèse, en fonction de sa concentration dans le milieu, est plus importante que celle que nous même avons trouvée. Par contre, pour les feuilles âgées, elle est de même importance. Ce travail nous a montré que, lorsque leurs concentrations sont cinq fois plus fortes que celle du manganèse, tous les oligo-éléments n'ont pas le même effet sur l'absorption et la migration de ce dernier.

Ainsi, le cuivre en concentration cinq fois plus forte (0,1015 ppm) semble avoir un effet défavorable sur la migration, vers les parties aériennes de la plante, du manganèse qui se trouve accumulé dans les racines. Il en va de même pour le fer quand il est en concentration trois fois plus forte (4,56 ppm). CUMBUS et al. (1977) ont remarqué que l'augmentation de la concentration du fer dans le milieu inhibe la migration du manganèse vers les parties aériennes. D'après nos résultats, nous pouvons être d'accord avec eux. NASON et al. (1952), HEWITT (1963), considèrent que le fer favorise l'absorption du manganèse. Par contre, le zinc et le bore, en concentration cinq fois plus forte (0,25 et 2,495 respectivement), n'ont pas cet effet mais le zinc en excès augmente faiblement l'accumulation du manganèse par les différents organes du blé. WARNOCK, en 1970, a montré l'inverse sur le maïs. Il est nettement montré que la quantité de bore, contenue dans les racines et la première feuille, n'augmente que d'une fois et demie quand sa concentration dans le milieu augmente cinq fois alors que celle contenue dans les jeunes feuilles augmente presque de trois fois. CLARK (1978) a noté que les racines fixent moins de bore que les parties aériennes. Cela peut expliquer la mort des apêx des feuilles remarquée dans notre troisième essai. Nous soulignerons l'intérêt de ce résultat pour les céréales de grande culture, surtout dans la vallée de l'Euphrate, en Syrie, où la toxicité du bore se manifeste ; mais, ceci exigera une étude complémentaire sur place.

Par ailleurs, nous avons pu remarquer qu'une concentration en fer trois fois plus forte dans la solution nutritive a réduit celle du bore dans les jeunes feuilles mais, a par contre, augmenté celle des racines, tandis que la première feuille a la même concentration en bore que dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive complète. Il semble possible que le fer en excès ait un effet négatif sur la migration du bore vers les jeunes feuilles, ce qui peut réduire l'effet toxique de bore en excès sur les apêx que l'on vient de voir.

Ce travail a montré aussi que, dans le cas des plantes cultivées en solution nutritive contenant cinq fois plus de zinc, la concentration en bore a été augmentée dans les racines par rapport à celle obtenue dans le cas de la solution nutritive complète. COÏC et al. (1971) ont signalé cette influence du zinc sur le bore.

CUMBUS et al. (1977) ont noté, comme nous même l'avons trouvé, que l'augmentation du zinc et du manganèse inhibe la migration du fer vers les feuilles car le zinc a, vraisemblablement, le rôle d'un cation compétitif pour le métabolisme du fer mais non pas pour l'absorption initiale de cet élément par les racines. Ces auteurs ont montré également que l'augmentation du manganèse, dans le milieu, réduit la migration totale du fer. D'autres auteurs ont même signalé un antagonisme entre le fer et le manganèse (SHIVE, 1941 ; CHIU, 1967 ; ALVAREZ-TINAUT et al., 1980).

WARNOCK (1970) a montré qu'une concentration en zinc cinq fois plus forte réduit l'absorption et l'assimilabilité du fer par le maïs. Nos résultats sont en bon accord avec ce qui précède. TIFFIN, en 1972, a signalé que l'augmentation de la migration du fer est associée à une faible concentration et migration du zinc. Ces observations nous montrent la prudence avec laquelle la fertilisation par ces deux oligo-éléments doit être conduite.

D'après les résultats de la répartition du cuivre, nous pouvons penser que l'effet toxique du cuivre, en excès dans la solution nutritive, peut se manifester d'abord sur les racines. Cet effet a été nettement remarqué sur la croissance des racines dans le cas d'une concentration en cuivre dans le milieu cinq fois plus forte. Cette accumulation du cuivre dans les racines peut entraîner une difficulté de la plante à augmenter la concentration en cuivre des parties aériennes. Quand la concentration du cuivre augmente cinq fois dans la solution, la teneur dans les feuilles n'augmente que deux fois au maximum. COÏC et al. (1974) ont noté que cette teneur n'augmente que d'une fois et demie dans les feuilles de dactyle. En outre, d'après nos résultats, la présence du fer en concentration trois fois plus forte a augmenté l'assimilabilité du cuivre dans les différents organes du blé. OLSEN, en 1972, a signalé que l'addition du fer réduit l'assimilabilité du cuivre par l'avoine cultivée sur un sol tourbeux.

Nos résultats sur la concentration du cuivre, en présence d'une concentration en manganèse cinq fois plus forte, montrent que cette dernière n'a pas un effet remarquable sur celle du cuivre dans les différents organes du blé.

BOWEN (1969) et MOORE (1972) ont indiqué que le manganèse n'a pas d'effet sur le cuivre car le mécanisme d'absorption du manganèse est différent de celui du cuivre en ce qui concerne leurs sites spécifiques d'absorption.

En règle générale, il a souvent été montré que la sensibilité de la plante à l'excès d'un oligo-élément dans le milieu tenait davantage à la plus grande vitesse d'accumulation dans la plante qu'à une différence de sensibilité du tissu. Mais, d'après COÏC et al. (1971) : *"on ne peut toutefois lier la différence de sensibilité à la déficience en un oligo-élément à la concentration dans la plante de l'oligo-élément concerné. La teneur en un oligo-élément d'une plante exprime l'équilibre entre l'accumulation de l'oligo-élément et l'accumulation de matière sèche. Celle-ci est principalement constituée de matière organique issue de la photosynthèse. Si, en cas de déficience en un oligo-élément, la plante voit sa photosynthèse plus réduite pour une même concentration en l'oligo-élément de la feuille, elle aura, par la suite, une concentration en cet oligo-élément supérieure à celle de la plante moins sensible"*.

En outre, il découle de cette étude que l'augmentation de la concentration d'un oligo-élément n'a pas forcément un effet favorable sur l'enrichissement des organes de la plante en un autre oligo-élément et cet effet peut être différent d'un organe à l'autre. La capacité d'échange cationique des racines joue un rôle important dans la quantité absorbée des oligo-éléments (MOORE, 1972), d'autant plus que, par différents moyens, les racines des plantes modifient la mobilité ainsi que le processus de transfert de ces ions (NAMBIAR, 1976). Par contre, SAPEK et al. (1976) ont signalé, qu'en fonction de la teneur en cuivre des sols, on peut prévoir celle des plantes des prairies et des pâturages.

5. CORRELATION ENTRE LES ABSORPTIONS DES OLIGO-ELEMENTS.

Nous venons de voir, dans le paragraphe précédent, des résultats très nets de l'influence de l'oligo-élément sur l'absorption et la

répartition d'un autre. L'étude statistique des corrélations effectuée au tableau 32 nous a confirmé cette conclusion d'une grande importance pratique du point de vue fertilisation, surtout dans les pays en voie de développement où se posent de plus en plus de problèmes souvent considérables.

Nous avons montré que, d'une façon générale, l'un des oligo-éléments, en forte concentration, peut agir sur l'absorption des autres éléments du même milieu ; autrement dit, cette absorption n'est pas liée dans tous les cas à la teneur d'un élément dans le milieu mais plutôt à celle d'un autre élément. MORAGHAN (1979) l'a bien montré pour le fer et le manganèse. Nous pensons qu'il est possible que la différence entre le mécanisme d'absorption et d'action des éléments ait une influence sur ce phénomène car certains oligo-éléments (fer, cuivre, zinc) sont, soit partie intégrante des enzymes qui président à la synthèse des matières organiques, soit des activateurs d'enzymes qui peuvent être, contrairement aux premiers, partiellement remplacés dans ce rôle par d'autres ions métalliques (GROS, 1979).

Par ailleurs, dans le cas où les oligo-éléments existent en concentration suffisante, nous n'avons noté aucun antagonisme entre ces éléments et il n'existe aucune corrélation négative. Nous pouvons dire que, dans ce milieu équilibré, les oligo-éléments ont, entre eux, une action synergique. Quand on examine les concentrations de ces éléments dans les différents organes de blé, on voit qu'elles sont en accord avec les concentrations trouvées par d'autres auteurs. HAQUE et al. (1979), en établissant les corrélations entre zinc et cuivre et zinc et manganèse dans le sol, ont signalé qu'elles étaient positives et significatives mais, pour eux, celle existant entre le zinc et le fer ne l'est pas.

Quand on augmente la concentration d'un oligo-élément tout en laissant stable celles des autres, nous trouvons des résultats plus significatifs ; ainsi, pour une concentration en bore cinq fois plus forte, les coefficients de corrélation sont toujours positifs (voir tableau 32). Nous n'avons pas observé l'antagonisme entre le cuivre et le bore que COÏC et al. (1971) ont signalé. Cette étude n'a pas mis de corrélation en évidence. Par contre, pour une concentration

en fer trois fois plus forte, nous avons trouvé que les corrélations entre manganèse et fer et zinc et fer, sont négatives et significatives (respectivement -0,832 et -0,734) ; les concentrations de ces éléments dans les plantes sont en faveur de ces résultats trouvés également par WALLACE et al. (1973), par ALVAREZ-TINAUT et al. (1980) pour le manganèse et le fer, et par CUMBUS et al. (1977). En effet, les auteurs ne tiennent pas tous le même raisonnement sur l'interaction fer-manganèse ; certains pensent qu'elle résulte d'un antagonisme entre ces deux éléments ; d'autres hypothèses sont basées sur la fonction de réduction de ces deux éléments. Nous estimons qu'aucune de ces hypothèses n'est suffisante à elle seule.

L'antagonisme entre le fer et le zinc a été remarqué aussi en cas d'excès en zinc dans le milieu de culture.

Notre travail n'a pas montré de corrélation positive et significative entre le zinc et le bore en présence d'un excès en zinc, phénomène encore peu étudié.

Nous pensons, ainsi, que les interactions entre les oligo-éléments, surtout en présence de l'un d'eux en concentration plus forte que les autres, peuvent jouer un rôle considérable sur l'action physiologique de chacun de ces oligo-éléments et que ces problèmes d'interaction sont un sujet de recherche délicat mais de plus en plus abordé.

6. CORRELATION ENTRE LES ABSORPTIONS DES MACRO ET DES OLIGO-ELEMENTS.

Dans le cas des solutions nutritives de macro-éléments et des solutions nutritives complètes, cette étude a mis en évidence des corrélations positives et significatives, au risque de 5 %, entre les éléments majeurs, sauf pour magnésium-phosphore et calcium-phosphore. La corrélation que nous avons trouvée entre le calcium et le phosphore est en accord avec celle trouvée par BROWN et al. (1977) pour ces deux éléments dans un essai sur le blé ; par contre, dans des cultures de tomates, ALVAREZ-TINAUT et al. (1980) ont signalé une corrélation positive et significative entre le calcium et le phosphore.

D'autre part, nous avons montré qu'avec des solutions nutritives complètes où les oligo-éléments sont à des taux suffisants il n'y a pas d'antagonisme entre les macro et les micro-éléments ; au contraire, sauf entre le calcium et le zinc, des corrélations positives et significatives existent entre ces éléments.

Ces résultats sont confirmés par les concentrations de ces éléments dans les différents organes. Par contre, nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre le calcium et le cuivre ainsi qu'entre le magnésium et le fer. Elles ne peuvent pas être reliées à la concentration de ces éléments dans la plante puisque chaque élément n'a pas été étudié séparément.

CONCLUSIONS GENERALES.

A la lumière de cette étude sur l'assimilabilité des oligo-éléments par la plante, la fiabilité des résultats obtenus grâce à une méthode que nous avons mise au point, nous a permis de montrer la différence d'accumulation de ces éléments en fonction des organes des plantes et de leurs concentrations dans les solutions nutritives.

Nous avons montré que toute étude sur l'assimilabilité des oligo-éléments devait comporter l'analyse des solutions nutritives et des plantes.

Après nous être assuré de la justesse et de la précision de nos résultats, nous avons mis en évidence que l'enrichissement en oligo-éléments des différents organes du blé n'est pas proportionnel à l'augmentation de leur concentration dans le milieu de culture.

Nous avons montré qu'il existe une difficulté inhérente à la plante à s'enrichir en ces éléments ; ce résultat est important si l'on considère la valeur nutritive et alimentaire de la plante.

L'analyse des solutions nutritives permet de suivre quantitativement l'absorption des oligo-éléments en fonction du temps et du stade de développement de la plante, ce qui est important du point de vue de la fertilisation. Nous avons constaté que :

- tous les éléments majeurs dosés sont absorbés en plus grande quantité pendant la première période des essais (les sept premiers jours),
- tous les oligo-éléments dosés sont absorbés en plus grande quantité pendant les deux premières semaines des essais,
- la présence des oligo-éléments, au taux de la solution utilisée, a un effet favorable sur l'absorption du potassium et du phosphore ; en revanche, il semble que les oligo-éléments aient une tendance à inhiber l'absorption du calcium et du magnésium.

Nous avons montré des interactions réciproques des oligo-éléments les uns sur les autres ; ces influences sont en relation avec la concentration, ainsi :

- 1°) le manganèse en excès semble avoir un effet négatif sur l'absorption du cuivre ;
- 2°) le fer en excès diminue l'absorption du zinc et du manganèse, ce qui montre un antagonisme entre le fer et ces deux éléments ;
- 3°) le zinc en excès semble avoir une influence négative sur l'absorption du fer ; il s'agit d'un antagonisme entre ces deux éléments ;
- 4°) le cuivre en excès diminue vraisemblablement l'absorption du manganèse.

En ce qui concerne l'analyse de la plante et l'assimilabilité des oligo-éléments par les différents organes du blé, cette étude conduit aux résultats suivants :

- 1°) les concentrations des éléments majeurs sont plus fortes dans les plantes cultivées en présence des oligo-éléments en taux suffisant que dans celles cultivées en leur absence ;
- 2°) le cuivre et le fer s'accumulent nettement dans les racines tandis que les feuilles constituent l'organe qui en accumule la plus faible quantité ;
- 3°) le zinc s'accumule préférentiellement dans les gaines plutôt que dans les autres organes de la plante ;
- 4°) le manganèse est mieux fixé par les feuilles que par les racines ;
- 5°) le bore migre rapidement vers les feuilles les plus âgées d'où il est très peu transporté vers les organes les plus jeunes. Ce résultat est important pour la fertilisation en bore lorsque l'on connaît l'importance du bore pour maintenir la croissance apicale et la division cellulaire.

En présence d'excès en oligo-éléments, nous pouvons conclure que :

- 1°) le manganèse s'accumule dans les racines ;
- 2°) le cuivre et le fer s'accumulent dans les racines alors que les jeunes feuilles sont les parties de la plante les plus pauvres en ces éléments ;
- 3°) les excès de fer et de bore semblent influencer positivement la migration du cuivre vers les parties aériennes ;

- 4°) en présence d'excès en bore, en zinc ou en fer, les racines accumulent plus de zinc que les parties aériennes ;
- 5°) l'excès de manganèse et de cuivre favorise la fixation du zinc par la première feuille ;
- 6°) l'excès de manganèse favorise la fixation du zinc dans tous les organes de la plante ;
- 7°) l'excès de fer diminue l'accumulation du zinc par les jeunes feuilles mais il augmente légèrement cette accumulation par les racines ; il inhibe aussi la migration du manganèse ;
- 8°) en présence d'excès de zinc, le bore s'accumule dans les racines tandis que, en présence d'excès de cuivre, de manganèse ou de fer, le bore s'accumule en plus grande quantité dans la première feuille ;
- 9°) l'excès de cuivre réduit la fixation du bore par la plante ;
- 10°) contrairement au manganèse, l'excès de zinc semble inhiber la migration du fer vers les jeunes feuilles.

Nous avons montré que la carence en oligo-éléments a une influence plus grande que leur excès, aux taux utilisés, aussi bien du point de vue qualitatif que quantitatif.

Les interactions entre les oligo-éléments et aussi celles, moins fréquemment signalées, entre les oligo-éléments et les macro-éléments, mettent en évidence la prudence avec laquelle la fertilisation oligo-minérale doit être effectuée.

Tout ceci montre l'importance des concentrations relatives des oligo-éléments du milieu nutritif sur leur absorption par la plante, ainsi que sur leur répartition dans les différentes parties des plantes.

BIBLIOGRAPHIE.

- ADAM, M.J., KIRKBIGHT, G.F., RIENVATANA, P., - 1975 - Molecular absorption spectra of some simple inorganic salts in the heated graphite atomizer. *Atom.Abs.Newsl.*, 14 (5), pp. 105-108.
- ALVAREZ-TINAUT, M.C., LEAL, A., RECALDEMARTINEZ, L., - 1980 - Iron manganese interaction and its relation to boron levels in tomato plants. *Plant and Soil*, 55 (3), pp. 377-389.
- ARNON, D.I., - 1948 - Trace elements in plant physiology. *Nature*, Londres, 364 p.
- ARNON, D.I., STOUT, P.R., - 1939 a - The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.*, 14, 371 p.
- ASO, K., - 1902 - On the physiological influence of manganese compounds on plants. *Bull. Coll.Agric.*, Tokyo, 5, pp. 177-185.
- AUBERT, H., PINTA, M., - 1977 - Trace elements in soils. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New-York, 395 p.
- 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. *Jour. of Plant Nat.*, 1 (1), pp. 25-37.
- BAROCCIO, A., MARIANI, G., COLESANTI, F., et al., - 1976 - Variation dans les teneurs en éléments minéraux de la plante, par action de doses croissantes d'engrais azotés normaux et à lente cession, en *Triticum durum*. 4ème Coll.Internation. sur le Contrôle de l'Alimentation des Plantes Cultivées. Ed.COTTENIE, A., Gent, II, pp. 513-519.
- BARTUSH, A.M., UNGER, I.A., - 1980 - Elemental concentration in plant tissues as influenced by low pH soils. *Plant and Soil*, 55 (2), pp. 157-163.
- BENAC, R., - 1976 - Comportement à l'égard de différentes concentrations du manganèse dans le milieu d'une espèce sensible (*Arachis hypogea* L.) et d'une espèce tolérante (*Zea mays* L.). *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 11 (1), pp. 43-51.
- BERTRAND, G., - 1905 - Sur l'utilisation du manganèse comme engrais. *C.R.Acad.Sci.*, Paris, 26, pp. 1255-1257.
- BERTRAND, G., JAVILLIER, M., - 1911 - Action du manganèse sur le développement de l'*Aspergillus niger*. *C.R.Acad.Sci.*, Paris, 152, 225 p.

- BONNEAU, M., SOUCHIER, B., - 1979 - Pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 459 p.
- BOWEN, J.E., - 1969 - Absorption of copper, zinc and manganese by sugarcane tissue. *Plant Physiol.*, 44, pp. 255-261.
- BRANDENBURG, E., - 1931 - Die herz-und trocken faüle der rubenals bormangel-erscheinung. *Phytopath. Z.*, 3, pp. 499-517.
- BROWN, J.C., - 1979 - Effects of boron stress on copper enzyme activity in tomato. *Jour. Plant Nut.*, 1 (1), pp. 39-53.
- BROWN, J.C., CLARK, R.B., - 1977 - Copper as essential to wheat reproduction. *Plant and Soil*, 48, pp. 509-523.
- BROWN, J.C., AMBLER, J.E., CHANEY, R.L., and al., - 1972 - Differential responses of plant genotypes to micronutrients. In "Micronutrients in agriculture". *Soil Sci.Soc.Amer. Inc. Madison Wisconsin*, pp. 389-418.
- BROWN, J.C., CHANEY, R.L., - 1971 - Effect of iron on the transport of citrate into the xylem of soy beans and tomatoes. *Plant Physiol.*, 47, pp. 837-840.
- BROWN, J.C., AMBLER, J.E., - 1970 - Further characterization of iron in two genotypes of corn. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.*, 34, pp. 249-252.
- BURSTRÖM, H., - 1950 - The action of manganese on roots. Trace elements in plant physiology. Ed. *Chronica-Botanica Compang*, pp. 77-84.
- CAMERLYNCK, R., - 1979 - Free and complexed forms of metallic elements in plants. Essential and non essential trace elements in the system soil-water-plant. *Labo.Anal.Agrochimistry, State Univ. Ghent, Belgium*, pp. 46-57.
- CHAMINADE, R., - 1964 - Etude des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Sci. Sol*, 2, PP. 157-167.
- CHAPMAN, H.D., - 1966 - Diagnostic criteria for plants and soils. *Univ. Calif. Berkely, Agric. Publ.*, 210 p.
- CHIU, T.F., - 1967 - Iron and manganese absorption by rice plants. *Soil Fert. Tawan*, 4, pp. 1-6.
- CLARK, R.B., - 1978 - Differential response of corn inbreds to calcium. *Soil Sci. Plant Analy.*, 9 (8), pp. 729-744.
- COÏC, Y., LESSAINT, Ch., - 1975 - La nutrition minérale et en eau des plantes en horticulture avancée. Le document technique de la SCPA-23, 22p.
- COÏC, Y., LESSAINT, Ch., CHOLET, Y., - 1974 - Accumulation comparée du cuivre dans les racines et parties aériennes des 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. de France*, pp. 1162-1171.

- COÏC, Y., TENDILLE, C., - 1971 - Causes connues des variations quantitatives des oligo-éléments dans les végétaux. Ann.Nutr.Alim., 25, pp. B 97-131.
- COPPENET, M., - 1968 - Les oligo-éléments. La fertilité du sol et la nutrition des plantes. Coll. Franco-Roumain, Bucarest, pp. 119-134.
- COTTENIE, A., - 1979 - Essential and non essential trace elements in the system soil-water-plant. Labo.Anal.Agrochemistry, State Univ. Ghent, Belgium, 75 p.
- COTTENIE, A., KIEKENS, L., - 1972 - Exchange of Zn, Mn, Cu and Fe in relation to saturation of the soil complex. Fac.Agric.Sci. State Univ. Gent, Belgique, 13 p.
- COTTENIE, A., KIEKENS, L., - 1973 - Quantitative and qualitative plant response to extreme nutritional conditions. Bull.Recherches Agron., Gembloux, pp. 543-556.
- CULVER, R.B., SURLS, T., - 1975 - Interference of molecular spectra due to alkali halides in non-flame atomic absorption spectrometry. Anal.Chem., 47 (6), pp. 920-921.
- CUMBUS, I.P., HORNSEY, D.J., ROBINSON, L.W., - 1977 - The influence of the phosphorus, zinc and manganese on absorption and translocation of iron in watercress. Plant and soil, 48, pp. 651-660.
- DECKOCK, P.C., HALL, A., McDONALD, M., - 1960 - A relation between the ratios of phosphorus to iron and potassium to calcium in mustard leaves. Plant and Soil, 12, pp. 128-135.
- DELAS, J., - 1977 - Méthodologies du diagnostic et de la correction des carences et toxicités. La fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes. Coll. Franco-Roumain, Bordeaux, pp. 77-90.
- DENNIS, R.W.G., O'BRIEN, D.G., - 1937 - Boron in agriculture, the west of Scotland Agriculture College, 100 p.
- DUCHAUFOR, Ph., - 1977 - Pédologie. 1-Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 477 p.
- EHLIG, C.F. - 1960 - Effets of salinity on four varieties of table grapes grown in sand culture. Proc.Amer.Soc.Hort.Sci., 76, pp. 323-350.
- FOY, G.D., FLEMING, A.L., ARMIGER, W.H., - 1969 - Differential tolerance of cotton varieties to excess manganese. Agron.Jour., 61, pp. 690-694.
- GENEVOIS, L., - 1971 - Les besoins d'oligo-éléments chez les végétaux et les conséquences de leurs carences. Ann.Nutr.Alim., 25, pp. B 205-230.
- GERLOFF, G.C., STOUT, P.R., JONES, L.H.P., - 1959 - Molybdenum-manganese iron antagonism in the nutrition of tomato plants. Plant Physiol., 34, pp. 608-616.
- GOODALL, D.W., GREGORY, F.G., - 1947 - Chemical composition of plants as an index of their nutrition status. Imper.Bur. Hort.Plant crops, East Malling, Tech.Comm., 17, 1675 p.

- GORSLIN, G.W., BAKER, D.E., THOMSON, W.I., - 1965 - Accumulation of eleven elements by field corn (*Zea mays* L.). Penn.Stat.Univ.Exp. Sta.Bull., 725, 30 p.
- GRAHAM, R.D., - 1976 - Anormalous water relations in copper deficient wheat plants. Aust.Jour.Plant Physiol., 31, pp. 229-236.
- GRAVES, C.J., STUCLIFFE, J.F., - 1974 - Effect of copper deficiency on the intiation and development of flower buds of *Chrysanthemum morifolium* grown in solution culture. Ann.Bot., 38, pp. 729-738.
- GREGORY, F.G., BRENCHLEY, W.E., - 1945 - Report on work on iron chlorosis in flax. Rep. Mineral deficiencies Conf.Agric.Res.Coun., 7, 861 p.
- GROS, A., - 1979 - Engrais. Ed.Maison Rustique. Paris, 7ème Ed., 260 p.
- HAGEMAN, R.H., FLESHER, D., WABOL, J.J., et al., - 1961 - An improved nutrient culture technique for growing corn under green house conditions. Agron.Jour., 53, pp. 175-184.
- HALLSWORTH, E.G., GREENWOOD, E.A.N., YATES, M.G., - 1964 - Studies on the nutrition of forage legumes. III-The effect of copper on nodulation of *Trifolium subterraneum* L. and *Trifolium repens*. Plant and Soil, 20, pp. 17-33.
- HAQUE, I., ODELL, R.T., WALKER, W.M., et al., - 1979 - Micronutrient cation survey of lowland rice in Sierra Leone. Soil Sci.Plant anal., 10 (6), pp. 981-992.
- HELLER, R., - 1977 - Physiologie végétale. Tome 1- Nutrition. Masson, Paris, 244 p.
- HERA, C., DORNESCU, D., - 1977 - Recherches concernant l'influence du zinc sur la production du maïs, du haricot et du soja des tchernozems de la plaine de Moladavie (Roumanie). La fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes. Coll. Franco-Roumain, Bordeaux, pp. 153-163.
- 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., - 1954 - Metal interrelationships in plant nutrition. II-The relation of metal toxicity, molybdenum and nitrogen source to chlorophyll and magnesium content of beet in sand culture. Jour. Exp.Bot., 5, pp. 110-118.
- HEWITT, E.J., - 1961 - The present status of research on the importance of iron, manganese, zinc and boron in crop nutrition. Summary and discussion of the paper ; Co-OP. Res. project on trace elements of the sub. Comm.Agric.Res. of ECA meeting in Dublin, may 1959, FAO, Rome.
- HEWITT, E.J., - 1963 - The essential nutrient elements : requierement and interactions in plants. "Plant physiology", V. III : Inorganic nutrition of plants. Ed. STEWARD. Acad.Press. New-York and London, 811 p.

- HEWITT, E.J., BOLLES-JONES, E.W., MILLES, P., - 1954 - The production of copper, zinc and molybdenum deficiencies in crop plants grown in sand culture with special reference to some effects of water supply and seed reserves. *Plant and Soil*, 5, pp. 205-222.
- HODGSON, J.F., - 1963 - Chemistry of the micronutrient elements in soils. *Adv.Agron.*, 15, pp. 119-159.
- HOYT, P.B., NYBORG, M., - 1971 - Toxic metals in acid soils : II- Estimation of plant available manganese. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.*, 35, pp. 241-244.
- HUGUET, Cl., - 1977 - Méthodes du diagnostic et de la correction des carences et des toxicités en oligo-éléments chez les arbres fruitiers. La fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes. *Coll. Franco-Roumain, Bordeaux*, pp. 67-76.
- ISARANGKURA, R., PEASLEE, D.E., RAYMOND, L., - 1978 - Utilization and redistribution of Zn during vegetative growth of corn. *Agron. J.*, 70, pp. 243-246.
- JACHSON, T.L., CARTER, G.E., - 1976 - Nutrient uptake by Russet burbank potatoes as influenced by fertilization. *Agron. J.*, 68 (1), pp. 9-12.
- JAVILLIER, M., - 1912 - Utilisation du zinc comme engrais catalytique. 8ème Congrès International. *Chim.Appl.*, 15, pp. 145-146.
- KERGUELEN, M., - 1960 - Aspects des variations de la composition de quelques fourrages en fonction des espèces, des stades de végétation des conditions de sol et de fertilisation. *Ann.Amélior.Plantes*, 10 (2), pp. 177-236.
- KIEKENS, L., - 1975 - Studies on the adsorption and desorption of Zn by soils. *Med.Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent.*, 40, pp. 1481-1491.
- KING, P.M., ALSTON, A.M., - 1975 - Diagnosis of trace element deficiencies in wheat on eyre peninsula South Australia. In "Trace elements in soil-plant-animal systems. Ed. NICHOLAS, J.D. et EGAN, A.R., Acad.Press. New-York, pp. 339-352.
- KNOP, W., - 1865 - Quantitative untersuchungen über die Ernährungsprocesseder pflanzen. *Landw.Vers Stat.*, 7, pp. 93-101.
- KUO, S., MIKKELSEN, D.S., - 1979 - Zinc adsorption by two alkaline soils. *Soil Sci.*, 128 (5), pp. 274-280.
- LACATUSU, R., HER, Cr., DORNESCU, D., - 1977 - Recherches sur la nutrition minérale du maïs en fonction des phases de végétation et de la fertilisation phosphatée. La fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes. *Coll. Franco-Roumain, Bordeaux*, pp. 153-163.
- LINDSAY, W.L., - 1973 - Zinc in soil and plant nutrition. *Plant and Soil*, 39, pp. 147-186.
- LIPMAN, C.B., MacKINNEY, G., - 1931 - Proof of the essential nature of copper for higher plants. *Plant Physiol.*, 6, pp. 593-599.
- LOCKMAN, R.B., - 1970 - Plant sample analysis as affected by sample decomposition prior to laboratory processing. *Comm.Soil Sci. Plant. Anal.*, 1, pp. 13-16.

- LÖHNIS, M.P., - 1951 - Manganese toxicity in field and market garden crops. *Plant and Soil*, 3 (3), pp. 193-222.
- LORENZ, O.A., TYLER, K.B., - 1976 - Soil and plant tissue testing in California. *Univ. California Div. Agr.Sci.Bul.*, 1879, pp. 21-24.
- MASK, P.L., WILSON, D.O., - 1978 - Effect of Mn on growth, nodulation and nitrogen fixation by soybeans grown in the greenhouse. *Soil Sci. Plant Anal.*, 9 (8), pp. 653-666.
- MAYNARD, D.N., - 1979 - Nutritional disorders of vegetable crops : a review *Jour. Plant Nutr.*, 1 (1), pp. 1-23.
- MAZE, P., - 1914 - Influences respectives des éléments de la solution minérale sur le développement du maïs. *Ann.Inst.Pasteur*, 28, pp. 1-68.
- McMURTREY, J.E., - 1964 - Nutrient deficiencies in tobacco. Hunger signs in crops. Ed. Sprague H.B. DAVID MCKAY, New-York, pp. 99-142.
- MILLER, E.C., - 1938 - *Plant physiology*. 2nd Ed. McGraw Hill, New York, 350 p.
- MILLIKAN, 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. *Jour.Aust.Inst. Agric.Sci.*, 13, pp. 180-186.
- MILLIKAN, C.R., - 1961 - Plant varieties and species in relation to the occurrence of deficiencies and excess of certain nutrient elements. *J.Aust.Inst.Agric.Sci.*, 27, pp. 110-233.
- MITCHELL, R.L., - 1963 - Increased translocation of plant growth-modifying substance ducto application of boron. *Jour.Royal Agric. Soc. England*, 124, pp. 75-86.
- MORAGHAN, J.T., - 1979 - Manganese toxicity in flax growing on certain calcareous soils low in available iron. *Soi Sci.Soc.Am.J.*, 43, pp. 1177-1180.
- MOORE, D.P., - 1972 - Mechanisms of micronutrient uptake by plants. in "Micronutrients in agriculture". Ed. MORTVEDT-chairman, J.J., GIORDANO, P.M., LINDSAY, W.L., *Soil Sci.Soc.Amer.Inc. Madison, USA*, pp. 171-198.
- MULDER, E.G., GERRESTEN, F.C., - 1952 - Soil manganese in relation to plant growth. *Adv.Agron.*, 4, pp. 222-272.
- NAMBIAR, E.K.S., - 1976 - Relationships between root growth and the uptake of micronutrients by plants with special reference to inter- and intra-specific root mixing. 4ème Coll.Internation. sur le Contrôle de l'Alimentation des Plantes Cultivées. Ed. COTTENIE, A. B 9000 Gent. I, pp. 553-562.
- NAMBIAR, E.K.S., - 1976 - Genetic differences in the copper nutrition of cereals. *Aust.J.Agric.Res.*, 27, pp. 453-463.
- NAMBIAR, E.K.S., COTTENIE, A., - 1971 - Influence of soil moisture status on the micro element uptake by maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*). *Agrochimica*, 15 (2-3), pp. 259-268.

- NASON, A., OLDEWURTEL, H.A., PROPST, L.M., - 1952 - Role of micronutrient elements in the metabolism of higher plants. *Ach.Biochem. Biophys.*, 38, pp. 1-38.
- NICHOLAS, D.J.D., - 1961 - Minor mineral nutrients. *Ann.Rev.Plante Physiol.*, 12, pp. 63-71.
- OERTLI, J.J., KOHL, H.C., - 1961 - Some considerations about the tolerance of various plant species to excessive supplies of boron. *Soil Sci.*, 92, pp. 243-247.
- OHKI, K., - 1976 - Manganese deficiency and toxicity levels for Bragg soybeans. *Agro.J.*, 68, pp. 861-864.
- OLSEN, L.R., - 1972 - Micronutrient interactions. in "Micronutrients in agriculture". Ed. MORTVEDT-chairman, J.J., GIORDANO, P.M., LINDSAY, W.L., Soil Sci.Soc.Amer.Inc. Madison, USA, pp. 243-264.
- PANDEY, D.P., KANNAN, S., - 1979 - Absorption and transport of iron in plants as influenced by the major nutrient elements. *J.Plant Nut.*, 1 (1), pp. 55-63.
- PEASLEE, D.E., LEGGETT, J.E., - 1980 - Utilization of seed zinc by *Zea mays* seedlings. *Soil Sci.Plant Anal.*, 11 (3), pp. 223-229.
- PEDRO, G., DELMAS, A.B., - 1970 - Les principes géochimiques de la distribution. *Ann.Agron.*, 21 (5), pp. 483-515.
- PINTA, M., - 1978 - Modern methods for trace element analysis. Michigan, *Ann Arbor Sci.*, pp. 492-498.
- PINTA, M., OLLAT, C., - 1961 - Recherches physico-chimiques des éléments traces dans les sols tropicaux. Etude de quelques sols du Dahomey. *Geochim.Cosmochim.Acta*, 25 (1), pp. 14-23.
- PINTA, M., RIANDEY, C., - 1975 - Etude physico chimique du mécanisme de l'atomisation thermoélectrique et de ses perturbations. *Analisis*, 3 (2), pp. 86-93.
- PINTA, M., le Comité Inter-Instituts, - 1975 - Etalons végétaux pour l'analyse foliaire. *Analisis*, 3 (6), pp. 345-353.
- PINTA, M., et collaborateurs, - 1979 - Spectrométrie d'absorption atomique. Applications à l'analyse chimique. Tome I, 2ème Ed., Masson-ORSTOM, Paris, 259 p.
- PIPER, C.S., - 1942 - Investigations on copper deficiency in plants. *Jour.Agric.Sci.*, 32, pp. 143-150.
- POELSTRA, P., FRISSEL, M.J., EL-BASSAM, N., - 1979 - Transport and accumulation of Cd-ions in soils and plants. *Jour.Plant Nut.Soil Sci.*, 142 (6), pp. 848-864.
- PRICE, C.A., CLARK, H.E., FUNKAUSER, E.A., - 1972 - Functions of micronutrients in plants. in "Micronutrients in agriculture". Ed. MORTVEDT-chairman, J.J., GIORDANO, P.M., LINDSAY, W.L., Soil Sci. Soc.Amer.Inc. Madison, USA, pp. 231-242.
- RAM, L.C., - 1980 - Cation exchange capacity of plant roots in relation to nutrients uptake by shoot and grain as influenced by age. *Plant and Soil*, 55 (2), pp. 215-224.

- RAULIN, J., - 1869 - Etudes chimiques sur la végétation. Ann.Sci.Nat. Bot., 5 (11), pp. 93-299.
- REHAB, F.I., WALLACE, A., - 1978 - Excess trace metal effects on cotton. 5. Nickel and cadmium in solution culture. Soil Sci.Plant Anal., 9 (8), pp. 771-778.
- REUTHER, W., SMITH, P.F., - 1953 - Effects of high copper content of sandy soil on growth of citrus seedlings. Soil Sci., 75, pp. 219-224.
- RICEMAN, D.S., JONES, G.B., - 1958 - Distribution of zinc and copper in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) grown in culture solutions supplied with graduated amounts of zinc. Aust.J.Agric. Res., 9, pp. 73-122.
- ROBBINS, W.R., - 1946 - Growing plants in sand culture for experimental purposes. Soil Sci., 62, pp. 3-15.
- ROBIN, D.G., PEARCE, D.T., - 1979 - The sensitivity of hexaploid and octaploid triticales and their parent species to copper deficiency. Aust.J.Agr.Res., 30 (5), pp. 791-799.
- RORISON, I.H., - 1958 a - The effect of aluminium on legume nutrition. in "Nutrition of the legumes". Ed. HALLSWORTH, E.G., BUTTERWORTHS, Londre, pp. 34-46.
- RUSSEL, E.J., - 1961 - Soil conditions and plant growth. 9th Ed. RUSSELL, E.W., London, 638 p.
- SAEEDBHATTI, S., SARWAN, G., - 1977 - Response of corn to micro-nutrients (Zn and Cu) on a saline soil. I-Growth and ionic relationships. Plant and Soil, 48, pp. 719-724.
- SAEED, M., FOX, R.L., - 1978 - Influence of residual phosphate fertilizer on labile and extractable zinc in Hawaii soils. Soil Sci.Plant Anal., 9 (8), pp. 685-698.
- SALM-HORSTMAR, F., - 1851 - Recherche sur la nutrition de l'avoine particulièrement en ce qui concerne les matières qui sont nécessaires à cette nutrition. Ann.Chim.Phys., 32, pp. 461-472.
- SANCHEZ-PARCONDE, M.P., AZUARAS, Y.P., - 1979 - Equipo automatico para cultivo hidroponico con solusion circulante. Anal.Edaf.Agrobiologia, 1 et 2, pp. 207-220.
- SAPEK, B., SAPEK, A., - 1976 - La richesse en cuivre des sols tourbeux et la teneur de celui-ci dans les plantes des herbages. 4ème Coll.Internation. sur le Contrôle de l'Alimentation des Plantes Cultivées. Ed.COTTENIE, A., B 9000 Gent, 1, pp. 527-534.
- SAUCHELLI, V., - 1969 - Trace elements in agriculture. Reinhold, New York, 248 p.
- SCOTT, E.G., - 1960 - Effect of supra-optimal boron levels on respiration and carbohydrate metabolism of *Helianthus annuus*. Plant Physiol., 35, pp. 653-661.
- SHERFINSKI, J.H., - 1975 - A graphite tube degradation study of barium at gunshot residue levels. Atom.Abs.Newsletter, 14 (1), pp. 26-28.

- SHIVE, J.W., - 1941 - Significant role of trace elements in the nutrition of plants. *Plant Physiol.*, 16, pp. 435-445.
- SHROTRI, C.K., TEWARI, M.N., RATHORE, V.S., - 1979 - Effect of zinc on chlorophyll, sugars and starch contents in maize (*Zea mays L.*) INDIAN, J., *Exp.Biol.*, 17 (1), pp. 58-60.
- SILLANPÄÄ, M., - 1972 - Trace elements in soils and agriculture. *Soils Bul.*, 17, FAO, Rome, 67 p.
- SINGLE, W.V., - 1958 - The mobility of manganese in the wheat plant. I. Redistribution and foliar application. *Annals of Botany*, 22 (8), pp. 479-488.
- SMILDE, K.W., HENKENS, Ch.H., - 1967 - Sensitivity to copper deficiency of different cereals and strains of cereals. *Neth.J.Agric.Sci.*, 15, pp. 249-258.
- SOMMER, A.L., - 1931 - Copper as an essential element for plant growth. *Plant Physiol.*, 6, pp. 339-346.
- SOMMER, A.L., LIPMAN, C.B., - 1926 - Evidence of the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants. *Plant Physiol.*, 1, pp. 231-249.
- SPRAGUE, H.B., - 1964 - Hunger signs in crops. David McKAY, New-York, 461 p.
- STEWART, F.C., - 1963 - Plant physiology. III-Inorganic nutrition of plants. Acad.Press, New-York and London, 811 p.
- SWAINES, D.J., MITCHELL, R.L., - 1960 - Trace element distribution in soil profiles. *Jour.Soil Sci.*, 11 (2), pp. 347-368.
- SZALAY, A., SZILAGYI, M., - 1968 - Laboratory experiments on the retention of micro-nutrients by peat humic acids. *Plant and Soil*, 29, pp. 219-224.
- THORNE, D.W., WANN, F.B., ROBINSON, W., - 1951 - Hypotheses concerning lime-induced chlorosis. *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.*, 15, pp. 254-258.
- TIFFIN, L.O., - 1972 - Translocation in plant. in "Micronutrients in Agriculture". Ed. MORTVEDT-chairman, J.J., GIORDANO, P.M., LINDSAY, W.L., *Soil Sci.Soc.Amer.Inc.* Madison, USA, pp. 199-229.
- TOMS, J., - 1958 - The use of copper and zinc in the cereal growing districts of western Australia. *J.Dep.Agric.West.Aust.*, 7, pp. 197-203.
- TROCME, S., - 1970 - Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments. *Ann.Agron.*, 21, pp. 519-548.
- TROCME, S., - 1977 - Méthodologie du diagnostic et de la correction des carences et des toxicités en oligo-éléments des plantes non perennes et non prairiales. Coll. Franco-Roumain sur "la fertilité du sol et la nutrition oligo-minérale des plantes", Bordeaux, pp.53-66.
- VANEGMOND, F., AKTAS, M., - 1977 - Iron nutritional aspects of the ionic balance of plants. *Plant and Soil.*, 48, pp. 685-703.

- VETTER, H., TEICHMANN, W., - 1968 - Essais au champ avec apports d'engrais azotés et cupriques. Z.Pflanzenarn, 121, pp. 97-111.
- VIALLEE, B.L., WACKER, W.E.C., - 1970 - Metalloproteins in neurath H. The proteins, 2nd Ed. Acad.Press New-York, 5, 192 p.
- VINOGRADOV, A.P., - 1959 - The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soil (Translated from russian). Consultants Bureau New-York, 209 p.
- VLAMIS, J., WILLIAMS, D.E., - 1962 - Ion competition in manganese uptake by barley plants. Plant Physiol., 37, pp. 650-655.
- VON LIEBIG, J., - 1840 - Organic chimistry in its applications to agriculture and physiology. Ed. TAYLOR et WALTON, Londre, pp. 16-387.
- VON SACHS, J., - 1860 - Berichte über die physiologische Thätigkeit an der versuchsslation in Tharandt. Landw.Vers Stat., 2, pp. 219-224.
- WALLACE, T., - 1947 - Soil conditions and mineral deficiencies of plants. Conf.Ped.Med.Alger-Montpellier, pp. 248-266.
- WALLACE, T., - 1961 - The diagnosis of mineral deficiencies in plants (Acolour Atlas and Guide, 312 planches). 3rd Ed. H.M. Stationery Office, Londre, 108 p.
- WALLACE, A., ALEXANDER, G.V., - 1973 - Manganese in plants as influenced by manganese and iron chelates. Soil Sci.Plant Anal., 4, pp. 51-56.
- WARINGTON, K., - 1923 - The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. Ann.Bot., 37, pp. 629-672.
- WARNOCK, R.E., - 1970 - Micronutrient uptake and mobility mithin corn plants (*Zea mays L.*) in relation to phosphorus. Induced zinc deficiency. Soil Sci.Soc.Amer.Proc., 34, pp. 765-769.
- WEBB, R.A., - 1954 - The investigation of mineral deficiencies in some africain soils. 5th Internation.Congr. Soil Sci. Congo, 3, pp. 214-220.
- WHITH, R.P., DOLL, E.C., MELTON, J.R., - 1970 - Growth and manganese uptake by potatoes as related to liming and acidity of fertilizer bands. Soil Sci.Soc.Amer.Proc., 34, pp. 268-271.
- WILLIAMS, R.D., - 1959 - Mimeographed publication. Commonwealth Bureau of Pastures and Fields crops, Hurley, Berkshire, 1, 28 p.
- WOODHOUSE, W.W., - 1964 - Nutrient deficiencies in forage grasses. Hunger signs in crops. Ed. SPRAGUE, H.P., David McKAY, New-York, pp. 181-218.
- WOODRUFF, J.R., - 1979 - Soil boron and soybean leaf boron in relation to soybean yield. Soil Sci.Plant Anal., 10 (6), pp. 941-952.
- ZIEF, M., MITCHELL, J.W., - 1976 - Contamination control in trace elements. In Chemical Analysis. Ed. Wiley, J. and Sons, 47, pp. 22-40.