

# Les oligo-éléments en agriculture et élevage

Yves Coïc  
Marcel Coppenet

MIEUX COMPRENDRE

The logo for INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) features a circular emblem composed of vertical lines of varying heights, creating a textured, grid-like appearance.

**INRA**







# Les oligo-éléments en agriculture et élevage

Incidences sur la nutrition humaine

Yves Coïc  
Marcel Coppenet

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE  
147, rue de l'Université, 75007 Paris

© INRA, Paris, 1989  
ISBN 2-7380-0138-6

# Sommaire

PRÉFACE .....	VII
INTRODUCTION .....	IX
I. Les besoins alimentaires de la plante .....	IX
II. Les besoins minéraux de la plante. Définition des termes utilisés....	IX
III. Indispensabilité d'un élément minéral .....	XI
CHAPITRE I. — <b>Historique</b> .....	1
CHAPITRE II. — <b>Les oligo-éléments en physiologie végétale</b> .....	5
I. Rôle physiologique .....	5
II. Rôle de chaque oligo-élément : Fe, Cu, Zn, Mo, Mn, B, Cl .....	7
III. Leur absorption par la plante.....	14
IV. Leur migration et leur répartition dans les différents organes .....	16
V. Redistribution des oligo-éléments dans la plante .....	18
VI. Variations saisonnières des teneurs .....	19
VII. Les besoins des plantes. Différence de comportement des génotypes.	19
CHAPITRE III. — <b>Les oligo-éléments dans le sol</b> .....	23
I. Les « éléments-traces » dans l'écorce terrestre.....	23
II. Les « éléments-traces » dans les différentes roches .....	25
III. Localisation des « éléments-traces » dans les roches .....	27
IV. Altération des roches. Formation des sols .....	27
V. L'analyse chimique des sols.....	28
VI. Les facteurs de l'assimilabilité des oligo-éléments .....	31
VII. Rôle de la chélation dans l'assimilabilité des oligo-éléments. L'exem- ple du fer.....	32

<b>CHAPITRE IV. — Les déficiences et les toxicités</b> .....	41
I. Carences originelles et carences conditionnées .....	41
II. Corrélation entre la teneur du sol en un élément et la teneur correspondante du végétal .....	42
III. Les phytotoxicités .....	43
IV. Le diagnostic des carences et des toxicités .....	44
V. A propos de la fixation des normes d'interprétation des analyses de terre.....	45
VI. Sur la fréquence des cas de carence en oligo-éléments.....	46
VII. L'influence des pratiques de l'agriculture moderne sur la fréquence des cas de carences en oligo-éléments.....	48
 <b>CHAPITRE V. — La guérison des carences et des toxicités</b> .....	 51
I. Apports au sol .....	51
II. Apports sur les parties aériennes. Pulvérisations foliaires.....	55
III. La guérison des phytotoxicités .....	55
 <b>CHAPITRE VI. — Problèmes posés à l'agriculture française par les oligo- éléments en production végétale</b> .....	 57
I. Fer.....	58
— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	58
— Conditions d'apparition .....	59
— Moyens de lutte .....	59
— Toxicité du fer .....	60
II. Manganèse.....	60
— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	60
— Conditions d'apparition .....	61
— Moyens de lutte .....	62
— Toxicité du manganèse .....	62
III. Zinc.....	63
— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	63
— Conditions d'apparition .....	64
— Moyens de lutte .....	64
— Toxicité du zinc .....	65
IV. Cuivre .....	65

— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	65
— Conditions d'apparition .....	66
— Moyens de lutte .....	67
— Toxicité du cuivre .....	68
V. Bore .....	68
— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	68
— Conditions d'apparition .....	69
— Moyens de lutte .....	70
— Toxicité du bore .....	70
VI. Molybdène .....	70
— Plantes sensibles et symptômes de carence .....	70
— Conditions d'apparition .....	71
— Moyens de lutte .....	71
— Toxicité du molybdène .....	71
VII. Les oligo-éléments en l'absence de signes de carence .....	71
<b>CHAPITRE VII. — Les oligo-éléments pour les cultures hydroponiques .....</b>	<b>73</b>
<b>CHAPITRE VIII. — Les oligo-éléments et les animaux domestiques .....</b>	<b>75</b>
I. Généralités sur les symptômes de carence .....	75
II. Les carences rencontrées dans les élevages français .....	76
III. Les différents oligo-éléments. Carences et toxicités. Cuivre, Cobalt, Zinc, Manganèse, Sélénium, Iode, Molybdène, Fer .....	77
IV. Les teneurs des plantes fourragères en oligo-éléments .....	84
V. Conclusions. La complémentation minérale indispensable .....	93
<b>CHAPITRE IX. — La nutrition de l'homme en oligo-éléments .....</b>	<b>95</b>
I. Importance particulière attribuée à certains états physiologiques et pathologiques de l'homme .....	95
II. Les besoins de l'homme .....	97
III. L'alimentation de l'homme dans notre pays et pays similaires .....	98
<b>RÉSUMÉ ET CONCLUSION .....</b>	<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>109</b>



# Préface

Parmi les éléments minéraux dont la plante a besoin pour accomplir ses fonctions, certains sont nécessaires en si petites quantités qu'on les appelait autrefois « éléments traces ». Cette appellation suggère la difficulté de leur appréhension analytique et, en conséquence, la difficulté de la découverte de leur nécessité et donc de leur importance.

Comme tout élément indispensable à la vie végétale, ce n'est pas le besoin quantitatif qui en détermine l'importance agronomique mais la possibilité ou non pour la plante de satisfaire son besoin en l'élément considéré, aussi faible soit-il.

Quels rôles particuliers jouent ces « éléments traces » dans la plante, en supposant dès l'origine une action catalytique et non un rôle « plastique » ?

Que représente le sol du point de vue source alimentaire de micro-éléments nutritifs ? Comment se comportent ceux-ci du point de vue physico-chimique et, en conséquence, du point de vue de leur assimilabilité ?

Comment se font l'absorption et la migration de ces éléments chez la plante ? Quelles sont les différences entre espèces et cultivars vis-à-vis des besoins en ces éléments et de leur facilité d'alimentation ?

Comment en agriculture et en horticulture reconnaît-on et traite-t-on les déficiences en ces micro-éléments ?

Pour quelle part les végétaux participent-ils à la satisfaction des besoins des animaux et en définitive de l'homme en oligo-éléments, dont un grand nombre, indispensable aux animaux et à l'homme, ne sont pas nécessaires à la plante ?

Le sujet (et la bibliographie) est démesurément vaste et ce livre ne prétend pas le traiter de manière exhaustive, mais essaye de sélectionner, résumer et ordonner ce qu'il est nécessaire de connaître et de comprendre pour agir efficacement dans la pratique agricole, en fonction de sa diversité.

## Symboles chimiques des éléments cités

Al : Aluminium  
As : Arsenic  
B : Bore  
Ba : Baryum  
Be : Béryllium  
C : Carbone  
Ca : Calcium  
Cd : Cadmium  
Cl : Chlore  
Co : Cobalt  
Cr : Chrome  
Cu : Cuivre  
F : Fluor  
Fe : Fer  
Ga : Gallium  
H : Hydrogène  
Hg : Mercure  
I : Iode  
K : Potassium  
Li : Lithium

Mg : Magnésium  
Mn : Manganèse  
Mo : Molybdène  
N : Azote  
Na : Sodium  
Ni : Nickel  
O : Oxygène  
P : Phosphore  
Pb : Plomb  
S : Soufre  
Se : Sélénium  
Si : Silicium  
Sn : Etain  
Sr : Strontium  
Ti : Titane  
V : Vanadium  
W : Tungstène  
Zn : Zinc  
Zr : Zirconium

# Introduction

## I. Les besoins alimentaires de la plante

Pour se nourrir les plantes supérieures ont, comme tout être vivant, besoin d'énergie et de matières. La plante supérieure a la propriété fondamentale de pouvoir utiliser, comme source d'énergie, l'énergie lumineuse d'origine solaire et, notamment, les radiations bleues et rouges, en transformant de l'énergie électromagnétique en énergie chimique. Grâce à cette énergie, elle peut synthétiser ses matières organiques à partir de substances très simples : eau, gaz carbonique, oxygène, matières minérales.

Les animaux, par contre, utilisent essentiellement, directement ou indirectement, l'énergie chimique et les matériaux des aliments organiques originellement synthétisés par les végétaux. La vie animale dépend donc de la photosynthèse des végétaux qui crée des matières organiques de base (glucides) à partir de l'eau et du gaz carbonique. Elle dépend aussi de la synthèse par les plantes de substances organiques indispensables à l'animal et que celui-ci ne peut synthétiser à partir de substances organiques plus simples : ainsi l'animal doit trouver dans sa ration alimentaire des acides aminés indispensables, des vitamines...

L'animal et l'homme ont aussi besoin pour leur physiologie de substances minérales que la plante prélève dans le sol.

## II. Les besoins minéraux de la plante. Définition des termes utilisés

On classe généralement les éléments minéraux nécessaires à la plante en macro-éléments dont la plante a besoin en quantité élevée et en micro-éléments dont la plante a besoin en petite quantité. Ces derniers ont aussi été dénommés oligo-éléments, en France, lors de la découverte de leur indispensabilité (Bertrand, 1903) ; on les a également appelés éléments traces (« trace element » en langue anglaise, « Spurenelement » en langue allemande), cette appellation se référant à la difficulté de déterminer avec sûreté et précision la quantité très petite de ces éléments (« trace » signifiant : très petite quantité perceptible).

Ces notions quantitatives n'impliquent pas une hiérarchie dans l'importance physiologique des macro et micro-éléments : c'est celui qui est déficient par rapport au besoin de la plante qui prend l'importance la plus grande puisque

c'est lui qui conditionne la poursuite de la croissance et du développement de la plante. C'est pourquoi les termes éléments « majeurs » et éléments « mineurs » ont été rapidement délaissés.

D'autre part, les besoins quantitatifs des plantes sont fort variables suivant l'élément considéré et la frontière entre macro et micro-éléments n'est pas d'une grande évidence de ce point de vue : la différence des besoins relatifs en fer et molybdène est plus grande que la différence des besoins relatifs en phosphore et en fer (tabl. 1 et 2).

**Tableau 1.** — Teneurs comparées des sols et des végétaux en oligo-éléments (mg/kg MS ou ppm). Quantités nécessaires pour diverses cultures annuelles.

	Sols		Végétaux (feuilles)		Besoins (en g/ha/an)
	Élément total	Élément assimilable	Teneurs courantes	Seuil de carence	
Fer (Fe)	10 000-50 000		50-200	20 (poirier, aiguilles de pins)	1 000-2 000
Manganèse (Mn)	200-1 000	1-2	50-150	20 (céréales en herbe, arbres fruitiers)	
Zinc (Zn)	10-100	0,2-0,5	25-50	15 (maïs plante-entière, arbres fruitiers)	150-700
Cuivre (Cu)	8-40	0,2-0,5	5-15	5 (céréales en herbe, arbres fruitiers)	100-300
Bore (B)	5-80	0,1-0,5	5-40	20 (betteraves, luzerne)	25-100
Molybdène (Mo)	1-10	0,1-0,2	0,1-1	25 (tournesol) 0,1 (chou-fleur, luzerne)	80-200 5-20

Rappel des besoins en macro-éléments (kg/ha/an) : Azote (N) — 100-300 kg/ha/an  
 Phosphore (P) — 20-50 kg/ha/an  
 Potassium (K) — 100-400 kg/ha/an  
 Calcium (Ca) — 40-200 kg/ha/an  
 Magnésium (Mg) — 10-30 kg/ha/an  
 Soufre (S) — 10-40 kg/ha/an

C'est plutôt par leur rôle en physiologie cellulaire (en biochimie) que se distinguent ces deux classes d'éléments, rôle qui explique le faible besoin en ces micro-éléments nutritifs.

Nous avons retenu dans cet ouvrage le terme d'oligo-élément souvent employé dans la littérature française.

**Tableau 2.** — Teneurs en oligo-éléments de différents organes de plantes cultivées (en ppm de MS).

	Fer	Manganèse	Zinc	Cuivre	Bore	Molybdène
<b>Grains :</b>						
— Maïs .....	25-35	7-10	20-30	1,5-3	1-1,5	0,2-0,3
— Blé, orge .....	30-60	20-40	20-30	3-6	0,5-8	0,2-0,8
— Pois .....		10-20	30-45	5-10		
— Féverole, soja .....		20-25	40-60	10-18		
Pailles de céréales .....	100-150	10-100	10-50	3-10	0,5-8	0,1-0,3
Maïs-ensilage .....	100-150	30-40	20-30	4-7	2-3	0,2-0,3
Foins de graminées .....	100-150	50-150	18-30	4-6		0,5-0,7
<b>Betteraves :</b>						
— racines .....	100	20-50	25-35	4-8	8-12	0,1-0,3
— feuilles .....	150	40-60	25-35	4-8	10-40	0,1-0,6
Chou-fourrager, colza ....		20-50	25-35	3-4		0,5-0,8
Légumineuses fourragères, fanes de pois et féverole .....	150-250	20-50	20-35	5-10	20-40	0,3-1
Graminées fourragères, au stade pâture .....	120-200	50-150	30-35	5-10	5-10	0,5-1

- Les grains sont, dans l'ensemble moins riches que les organes végétatifs et, notamment, que les feuilles jeunes (graminées au stade pâture).
- Les grains de féverole et soja sont, d'après des résultats obtenus à l'INRA-Quimper, particulièrement riches en Cu et Zn.
- Les grains de protéagineux sont plus riches en Zn qu'en Mn.
- Les organes végétatifs des graminées sont toujours beaucoup plus riches en Mn qu'en Zn, alors que dans le cas des légumineuses et des crucifères les teneurs sont voisines.
- Les teneurs en Zn sont toutes très proches de 30 ppm.
- Le bore est nettement plus abondant dans les légumineuses et les feuilles de betterave.
- Quant aux besoins des diverses cultures, on ne peut se référer uniquement aux teneurs, puisqu'interviennent, évidemment, la vitesse de croissance et finalement la production à l'hectare.

### III. Indispensabilité d'un élément minéral

Arnon (1939, in Arnon, 1950) a indiqué les critères suivants comme fondements de l'indispensabilité (essentiality) d'un élément :

1. une déficience de l'élément rend la plante incapable d'accomplir la phase végétative ou reproductive de sa vie ;
2. le symptôme de déficience de l'élément en question peut être empêché ou corrigé seulement par apport de cet élément ;
3. l'élément est directement impliqué dans la nutrition de la plante, tout à fait en dehors de son effet possible de correction de quelque condition microbiologique ou chimique dans le sol ou le milieu de culture.

Le deuxième point a souvent été jugé trop rigide : par exemple, le molybdène est requis pour la fixation de l'azote par *Azotobacter*. Cependant, dans quelques espèces, le vanadium peut se substituer complètement au molybdène. Le chlore est nécessaire à la croissance des plantes supérieures ; d'autres halogènes comme le brome peuvent se substituer au chlore bien qu'à concentration plus élevée.

Suivant le critère d'Arnon, ni le molybdène ni le chlore ne pourraient être considérés comme strictement essentiels. C'est pourquoi Nicholas (1961) a suggéré que le terme « élément fonctionnel » ou « physiologique » soit utilisé pour tout élément minéral qui « fonctionne » dans le métabolisme de la plante, que son action soit spécifique ou non.

D'autre part, d'un point de vue agronomique, des éléments minéraux peuvent avoir un intérêt certain, quoique ne répondant pas aux critères d'essentialité précédemment définis, parce que, judicieusement utilisés, ils permettent des rendements accrus de quelques plantes cultivées. Ainsi, le sodium peut non seulement remplacer certains autres cations, notamment le potassium, pour quelques fonctions subalternes, mais permet d'accroître par son action spécifique le rendement de quelques espèces végétales : betteraves, céleris, navets... (Bollard et Butler, 1966).

Les macro-éléments essentiels à la plante sont :

- l'azote
- le soufre
- le phosphore
- le potassium
- le magnésium
- le calcium

En plus de ces macro-éléments indispensables aux plantes supérieures, on peut ajouter le sodium, indispensable à la plante halophyte *Atriplex vesicaria*, le silicium qui, pour le riz, est nécessaire à l'obtention de récoltes élevées.

Les micro-éléments essentiels aux plantes supérieures sont :

- le fer
- le manganèse
- le zinc
- le cuivre
- le bore
- le molybdène
- le chlore

On attribue aussi un besoin en sodium en tant qu'oligo-élément pour les plantes de type photosynthétique C4 (Brownell et Crossland, 1972).

Le cobalt est essentiel pour le *Rhizobium* qui est la bactérie des nodosités des racines des légumineuses permettant l'assimilation symbiotique d'azote gazeux.

Les animaux ont besoin, pour leur physiologie, de beaucoup d'autres oligo-éléments non indispensables aux plantes supérieures, qu'il serait bon qu'ils trouvent, au moins en partie, dans leurs aliments d'origine végétale, notamment en ce qui concerne les herbivores.

Le bore n'étant pas nécessaire à la physiologie animale, il s'agit, en plus du fer, du manganèse, du zinc, du cuivre, du molybdène et du chlore, du cobalt, de

l'iode, du sélénium, du fluor, de l'arsenic, du chrome, de l'étain, du nickel, du silicium et du vanadium.

En conséquence, les teneurs des plantes en ces oligo-éléments ont une certaine importance pour l'alimentation animale et humaine et ne doivent pas être négligées en tant que critères de qualité des produits végétaux alimentaires (tabl. 3).

**Tableau 3.** — Teneurs des sols et des végétaux en micro-éléments indispensables aux animaux (en mg/kg MS, ou ppm).

		Sols		Végétaux	
		Teneur courante	Fourchette	Teneur courante	Fourchette
Fluor	(F)	200	100-400		2-20
Vanadium	(V)	100	20-500	≠ 1	0,1-10
Arsenic	(As)	6	0,1-40	≠ 1	0,1-5
Nickel	(Ni)	40	10-1 000	≠ 1	0,1-3
Chrome	(Cr)	100	5-3 000	< 1	0,2-1
Iode	(I)	5	1-20	0,2	0,04-0,5
Cobalt	(Co)	8	1-40		0,02-0,5
Sélénium	(Se)	Finistère	2-15		0,02-0,2
		0,5	0,1-2		0,02-2
		Finistère			0,02-0,1

Une alimentation excessive en ces micro-éléments essentiels, mais aussi en certains qui sont inutiles, peut provoquer, à partir de certains seuils, des toxicités tant chez les plantes que chez les animaux. Il est donc nécessaire d'avoir des connaissances dans ce domaine.



## CHAPITRE I

# Historique

Retracer l'histoire de la découverte de la nécessité vitale des oligo-éléments pour la plante est, pensons-nous, très instructif. Il ne sera pas fait une bibliographie exhaustive mais nous voulons souligner seulement les étapes qui nous paraissent essentielles dans cette longue et continue recherche. Ce faisant, nous essaierons de distinguer les aspects scientifiques, techniques, pratiques, qui se sont conjugués pour arriver à l'état actuel de nos connaissances qui, bien entendu, ne constitue pas une fin. Quelques détails bibliographiques seront donnés ultérieurement sur chaque oligo-élément nutritif lorsque nous traiterons de leur rôle physiologique.

Entre 1843 et 1847, Eusèbe Gris présenta à l'Académie des Sciences plusieurs notes relatant des observations précises sur des essais de guérison de végétaux souffrant d'une « maladie » non parasitaire que l'on appellera beaucoup plus tard « maladie de carence ». Il s'agit de l'emploi de sels ferrugineux solubles (sulfate ferreux) pour guérir la chlorose foliaire de plantes appartenant à divers genres végétaux (Gris, 1844). On sait maintenant que cette chlorose ferrique est causée par une inassimilabilité du fer dans certains sols calcaires.

Ce travail est remarquable de divers points de vue :

1. parce qu'il montre que le fer agit sur la physiologie de la plante (reverdissement de la feuille), et en particulier, que les effets sont d'autant plus rapides que la température est plus élevée ;

2. parce qu'il fait absorber ces composés par la feuille aussi bien que par les racines, ce qui montre l'efficacité directe, sans possibilité d'action indirecte, de ces composés sur le sol et de plus constitue une voie d'apport à la plante qui, plus tard, sera largement utilisée : la pulvérisation foliaire ;

3. parce qu'il compare cette action physiologique à celle du fer dans le sang : « Les ferrugineux solubles stimulent, revivifient la chromule comme ils revivifient l'hématosine du sang ». Cette remarque représente une préconception de ce que l'on sait maintenant des actions physiologiques identiques que peuvent avoir certains oligo-éléments chez les micro-organismes, les végétaux et les animaux ;

4. parce que ces expériences débouchent sur un intérêt agronomique évident.

Pendant longtemps on n'a reconnu comme indispensables aux végétaux que l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, le calcium, le magnésium et le fer, ces éléments étant classés parmi les macro-éléments, sauf le fer.

Une autre étape importante a été franchie par Raulin (1863) qui, travaillant sur des végétaux inférieurs, montra que le zinc était indispensable dans la nutrition d'*Aspergillus niger* (*Sterigmatocystis nigra*). Il a fallu attendre quarante-cinq ans pour reconnaître la nécessité du zinc chez les végétaux supérieurs.

La connaissance de la nutrition en oligo-éléments indispensables des phanérogames doit beaucoup aux études faites sur les micro-organismes et, notamment, les champignons inférieurs.

Les moisissures produisent rapidement une grande quantité de matière à partir d'un très petit inoculum. Il y a donc une dilution rapide des éléments minéraux nutritifs que contient cet inoculum. Ce contenu est infime par rapport au besoin global de la culture, ce qui n'est pas le cas pour les plantes supérieures. D'autre part, le milieu de culture de ces moisissures est « synthétique » et purifié. Le test d'action (et de la nécessité) de l'oligo-élément considéré est la croissance, alors que, chez les végétaux supérieurs, s'y ajoutent des tests visuels ou des modifications morphologiques. Les travaux de Raulin furent suivis de nombreuses recherches : Javillier (1907) et Bertrand et Javillier (1911) montrèrent l'influence du manganèse sur la croissance de l'*Aspergillus niger*.

Pour montrer l'indispensabilité d'un oligo-élément pour les végétaux supérieurs il faut faire croître les plantes sur un milieu purifié (substrat inerte du point de vue alimentaire, solution nutritive synthétique...) c'est-à-dire débarrassé de l'oligo-élément dont la nécessité doit être prouvée.

Si Boussingault introduit l'idée de cultiver les plantes sur sable (qui permet à la racine de s'alimenter à partir d'une solution nutritive tout en trouvant l'oxygène qui lui est nécessaire), on doit beaucoup au chercheur allemand Salm-Horstmar (1849-1851) dont le travail représente le début de l'expérimentation moderne sur le problème des oligo-éléments. Il apporte des idées nouvelles, telles que le revêtement par la cire des pots de culture, le lavage à l'acide du sable, l'emploi de sable quartzueux ou de charbon de bois comme substrats racinaires, ainsi que la méthode de tester la nécessité d'un oligo-élément en privant une solution nutritive « complète » de cet oligo-élément. Ainsi, il produit sur l'avoine les symptômes connus sous le nom de « taches grises » (grey speck) causés par une déficience en manganèse.

Le perfectionnement des méthodes de purification des milieux a permis de connaître les oligo-éléments indispensables aux végétaux supérieurs. Quand on sait que le besoin quantitatif en fer peut être environ 1 000 fois plus grand que celui en molybdène, on comprend la difficulté de prouver la nécessité des « ultra-micro » éléments. Certains, le chlore par exemple, sont tellement ubiquistes qu'ils est nécessaire de purifier non seulement le milieu racinaire mais aussi l'atmosphère ambiante.

Comme nous l'avons fait remarquer, la semence des végétaux supérieurs peut contenir une quantité d'oligo-éléments, le molybdène par exemple, telle que la dilution par la croissance n'est pas suffisante et qu'il est nécessaire de faire plusieurs cultures successives dans un milieu déficient en cet oligo-élément pour appauvrir suffisamment les semences qui serviront à la recherche de l'indispensabilité de l'élément considéré.