

# **Problèmes posés par l'évaluation de la disponibilité pour la plante des éléments-traces du sol et de certains amendements organiques**

**C. JUSTE**

I.N.R.A.

Station d'Agronomie, Centre de Recherches de Bordeaux, 33140 Pont-de-la-Maye

---

## **SOMMAIRE**

*Après avoir passé en revue les nombreuses contraintes spécifiques liées à l'évaluation de la disponibilité en éléments-traces des sols, on décrit les principaux tests chimiques et biologiques actuellement utilisés pour tenter de résoudre ce problème qui préoccupe encore beaucoup d'agronomes. Le cas particulier de certains types de matériaux organiques susceptibles de fonctionner comme sources d'éléments-traces (boues de station d'épuration) est également évoqué. On souligne l'existence de nombreuses lacunes dans la connaissance du comportement de ces éléments dans le sol et la nécessité impérieuse d'aboutir rapidement à une harmonisation des très nombreuses méthodes d'évaluation de leur disponibilité existant actuellement.*

L'évaluation de la disponibilité des éléments minéraux du sol transférables dans les végétaux et qui ont une action sur le comportement et/ou la qualité de ces derniers a toujours constitué une des préoccupations majeures des agronomes.

La connaissance de cette caractéristique est en effet indispensable pour fixer les quantités d'éléments à ajouter au sol avant la mise en place de la culture, dont on souhaite évidemment que le comportement soit optimal, ou pour agir de telle sorte que cette disponibilité soit abaissée (cas des éléments toxiques ou dépréciateurs de la qualité).

Évaluer la disponibilité d'un élément, c'est mesurer « *in situ* » la quantité de cet élément qui peut être absorbée durant le déroulement d'un cycle végétatif ; un complément à cette définition doit être apporté dans le cas où l'élément est toxique : si celle-ci demeure en effet valable tant que la toxicité ne se manifeste pas, il est bien évident que dès lors qu'elle apparaît le fossé se creusera de plus en plus entre quantité de l'élément disponible dans le sol et quantité effectivement absorbée par le végétal dont la croissance sera déprimée, voire annihilée.

La majorité des recherches entreprises jusqu'à ce jour ont eu, et ont encore, pour objectif principal de définir par des artifices variés le stock minimal d'un élément donné du sol en deçà duquel des chutes de rendement sont prévisibles (seuils de carence) et le stock maximal au-delà duquel des chutes de rendement deviennent également prévisibles (seuil de toxicité).

Entre ces deux extrêmes et pour certains éléments (les éléments majeurs notamment), les recherches ont quelquefois permis d'évaluer des stocks qui permettent de caractériser le pouvoir alimentaire initial du sol (sol moyennement, bien ou très bien pourvu) et d'associer à cette caractéristique une quantité d'éléments à ajouter pour réaliser au mieux les objectifs de l'agriculteur.

## A. CONTRAINTES SPÉCIFIQUES LIÉES A L'ÉVALUATION DE LA DISPONIBILITÉ EN ÉLÉMENTS-TRACES DU SOL.

Le souci permanent d'évaluer un stock de l'élément dans le sol qui se rapproche le plus possible de la quantité qui sera absorbée par la plante au cours du déroulement sans heurt de son cycle a conduit les agronomes à mettre en œuvre des artifices d'évaluation de ce stock simulant l'activité extractrice du végétal (test chimique), voire, à la limite, à faire intervenir certaines plantes-tests susceptibles de procéder elles-mêmes à cette évaluation (test biologique).

Cette démarche très générale est valable aussi bien pour les éléments majeurs que pour les éléments mineurs ou éléments-traces du sol. Pour ces derniers, il faut convenir cependant de l'existence de contraintes particulières telles que :

### a) NATURE DES ÉLÉMENTS-TRACES

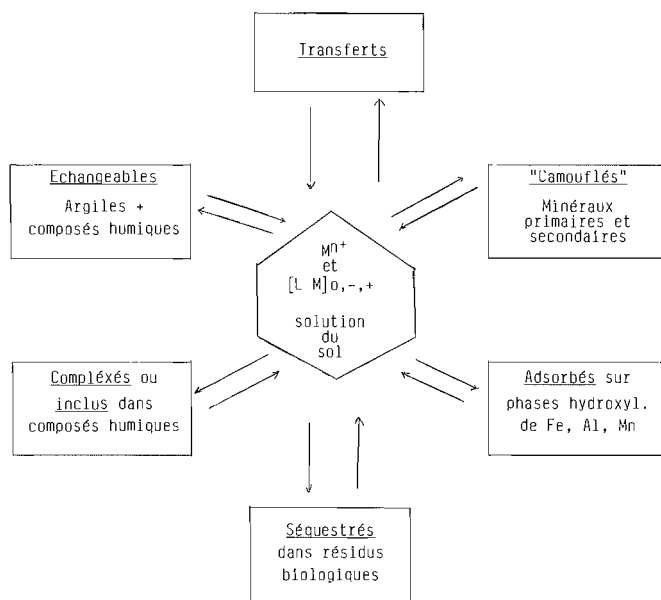
Ces derniers sont la plupart du temps des éléments métalliques de poids atomique élevé et de configuration électronique telle que leurs possibilités de liaison avec la phase fixatrice du sol sont extrêmement variées (Tableau 1). Dans ces conditions, le choix d'un réactif d'extraction unique qui aurait la vertu précieuse de ne sélectionner, parmi toutes les phases fixatrices du sol, que les fractions métalliques susceptibles d'être effectivement absorbées par le végétal représente une véritable gageure.

### b) MODICITÉ DES QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS-TRACES MOBILISÉES PAR LES VÉGÉTAUX

Par définition même, les éléments-traces interviennent dans les processus métaboliques dans le végétal à des concentrations extrêmement faibles (Tableau 2) ; pour être plus concret, leur demande est modeste et excède rarement les quelques centaines de grammes à l'hectare, alors que celle des éléments dits majeurs se situe dans l'ordre de grandeur de la centaine de kilogrammes à l'hectare. Il en résulte que l'évaluation d'un

TABLEAU 1. — *Etat des métaux dans les sols*

*Metal speciation in soils*



(B. GUILLET et al., 1980)

## DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS-TRACES

stock de disponibilité dans le sol des éléments-traces qui se rapprochait de la quantité effectivement absorbée par une culture se heurte à des difficultés analytiques insurmontables, même avec l'instrumentation la plus sophistiquée dont on dispose de nos jours.

**TABLEAU 2. — Ordres de grandeur moyens des teneurs en éléments majeurs méso-éléments et oligo-éléments dans les végétaux**

*Major and minor element range concentration values in plants*

<u>Eléments majeurs en g/kg de matière sèche :</u>	
- N	20
- P	4
- K	20
<u>Méso-éléments en g/kg de matière sèche :</u>	
- Mg	3
- Ca	16
- S	2
<u>Oligo-éléments en g/kg de matière sèche :</u>	
- Fe	0,10
- Mn	0,05
- Zn	0,03
- Cu	0,01
- B	0,02
- Mo	0.0015
- Co	0,00015

(TROCKE,,COPPENET et CALVEZ, 1967-1970)

Les tableaux 3 et 4 montrent bien l'écart très souvent énorme qui sépare les quantités d'éléments mineurs mobilisées par diverses cultures des quantités dites disponibles évaluées par différentes méthodes d'extraction dans des sols où l'offre en ces éléments est considérée comme satisfaisante. Dans le cas du Maïs (Tableau 3), on pourra constater, par contre, qu'en ce qui concerne les éléments dits majeurs cet écart est beaucoup plus faible et que les techniques d'analyses conventionnelles du sol peuvent donner un assez bon reflet de la quantité de fertilisants qui sera effectivement mobilisée au cours du cycle végétatif.

Pour mieux comprendre l'importance du problème analytique que soulève l'approche d'une évaluation du stock d'un élément-trace compatible avec la quantité mobilisable par une culture, on peut, en reprenant les données du tableau 3, calculer que les 60 g/ha de cuivre absorbés par le maïs exigeraient que l'on soit en mesure d'estimer une teneur du sol en cet élément de 0,015 ppm, ce qui obligerait le laboratoire à analyser des solutions de concentration en cuivre de l'ordre de grandeur du ppb. Cette hypothèse est d'autant moins raisonnablement envisageable en routine que l'imprécision bien connue de l'échantillonnage sur le terrain masquerait grossièrement le bénéfice éventuel d'une telle performance.

**TABLEAU 3. — Comparaison des quantités de quelques éléments minéraux disponibles d'un sol normalement pourvu et des quantités effectivement absorbées par une culture de maïs (18,5 t de M.S./ha)**

*Comparison between the amount of available mineral fertilizer in soil and the amount absorbed by a maize yield (18,5 D.M./ha)*

Élément	Quantité de l'élément absorbée durant la culture (kg/ha)	Quantité de l'élément "disponible" dans le sol (kg/ha)	Rapport de la quantité "disponible" à la quantité absorbée
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	70	600	8,6
K <sub>2</sub> O	255	600	2,4
MgO	50	400	8,0
Cu	0,060	20	333,3
Mn	0,530	40	75,5
Zn	0,410	20	48,8

### c) INTERACTIONS ENTRE ÉLÉMENTS-TRACES ET ÉLÉMENTS MAJEURS

Contrairement aux éléments majeurs, les éléments-traces donnent lieu à de multiples effets de compétition, tant au niveau de leur comportement dans le sol que de leur absorption par les végétaux et de leur intervention même au niveau des processus physiologiques.

Les méthodes d'évaluation de leur disponibilité dans le sol ne prennent pas en compte ces effets dont la liste est quasiment infinie : interaction Zn/P, Zn/Fe, Zn/Mn, S/Mo, Cu/NO<sub>3</sub>, Cd/Zn, Si/Mn, Fe/Mn, Cd/Ca, P/Cd, P/Ni, Fe/CaCO<sub>3</sub>... (Tableau 5). L'un des exemples les plus connus dans ce domaine est celui de l'interaction fer-zinc : la présence de fer dans le milieu de culture peut en effet, pour une disponibilité donnée du zinc, limiter les effets toxiques de ce dernier lorsqu'il existe en forte concentration dans le milieu. A l'inverse, on constate que, dans un milieu doté d'une disponibilité déterminée en fer, la diminution de celle du zinc entraîne une absorption de plus en plus importante du fer. Il est difficile à ce stade de faire intervenir une simple compétition au niveau de l'absorption de ces éléments ; il s'agit plutôt d'une modification de la physiologie de la plante, dont le pouvoir d'extraction vis-à-vis de l'un des deux éléments se trouve renforcé par la déficience de l'autre. Il est bien évident que, dans ces conditions, l'utilisation d'un simple réactif chimique est incapable de rendre compte, ou plus précisément de prédire, de tels phénomènes qui ne peuvent être mis en évidence que par le seul comportement de la plante (diagnostic de la carence en zinc par la mesure du rapport Fe/Zn chez le Maïs - Tableau 6).

Le problème des interactions se pose de manière aiguë quand le stock d'un grand nombre d'éléments-traces du sol se trouve brutalement accru à la suite, par exemple, de l'application de cocktails d'oligo-éléments du commerce ou encore de certains déchets comme les boues de station d'épuration ou les composts d'ordures ménagères. Il est bien clair que, dans ces conditions, la mobilisation de l'un des éléments-traces du mélange par le végétal risque d'être sans commune mesure avec celle que l'on observerait si l'élément-trace était ajouté seul, et cela bien que sa « disponibilité » évaluée par une méthode chimique conventionnelle soit la même dans les deux cas.

TABLEAU 4. — *Rapports des éléments-traces « disponibles » du sol aux quantités mobilisées par la plante*

*Comparison between micronutrient availability and plant uptake*

Élément	Culture	Réactif d'extraction	"Disponible" Mobilisé
ZINC	Haricot	Acétate NH <sub>4</sub> N	8,5
	Haricot	HCl 0,1 N	64
	Sorgho grain	Acétate NH <sub>4</sub> N	4,1
	Sorgho grain	HCl 0,1 N	32,5
	Maïs	Acétate NH <sub>4</sub> N + Dithizone	11,4
	Maïs	HCl 0,1 N	46
	Maïs	Acétate NH <sub>4</sub> N	72
MANGANESE	Avoine	Acétate NH <sub>4</sub> N + hydroquin.	685
	Seigle	Acétate NH <sub>4</sub> N + hydroquin.	206
	Avoine	Acétate NH <sub>4</sub> N	1,2
	Avoine	Acétate NH <sub>4</sub> N + réducteur	14,2
	Soja	Acétate NH <sub>4</sub> N	12,8
	Soja	Acétate NH <sub>4</sub> N + réducteur	15,8
CUIVRE	Millet	Acétate NH <sub>4</sub> N + Dithizone	35
	Millet	E.D.T.A.	63

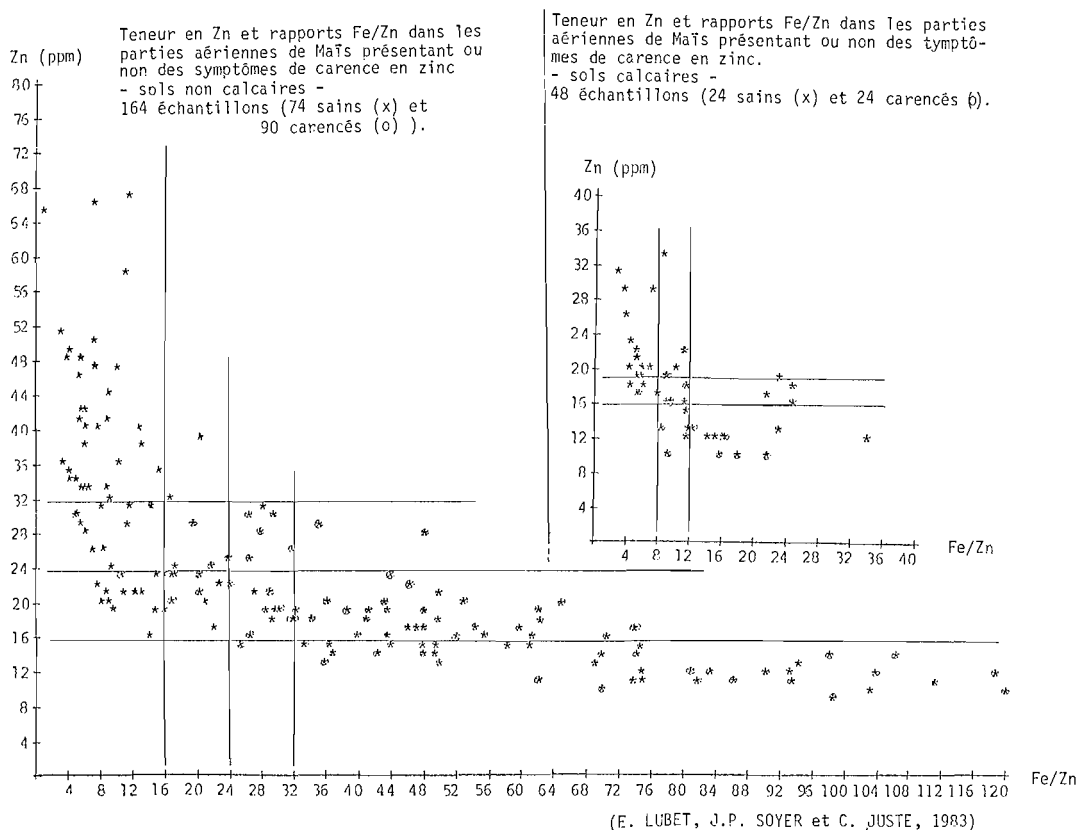
TABLEAU 5. — *Influence du molybdène et du soufre sur le rendement et la teneur en molybdène, soufre et azote de la luzerne*

*Effect of molybdenum and sulphur fertilization on the yield and the Mo, S and N content of Lucern*

Traitement	Production totale (5 coupes) g/pot	Indice de comparaison	Mo (ppm)	N (%)	S (%)
Témoin . . . . .	3,13	100	0,22	28,2	2,9
Molybdène (200 g/ha)	5,24	167	5,93	33,3	2,1
Soufre (200 kg/ha) (sulfate de Ca)	4,43	141	0,12	27,0	9,3
Soufre + Molybdène	16,66	531	0,62	41,3	4,4

**TABLEAU 6. — Utilisation du rapport Fe/Zn pour le diagnostic de la carence en zinc du maïs**

*Suitability of the Fe/Zn ratio determination in maize tissues for the zinc deficiency diagnosis*



**d) MODIFICATIONS INSTANTANÉES DE LA DISPONIBILITÉ EN ÉLÉMENTS-TRACES AU NIVEAU DE LA RHIZOSPHÈRE**

En raison de leur disponibilité généralement faible, les éléments-traces du sol sont l'objet de compétition sévère, dans les microsites où l'activité biologique est particulièrement intense, entre micro-organismes du sol et système racinaire. C'est le cas de l'environnement rhizosphérique où des immobilisations momentanées des métaux peuvent avoir lieu. On peut expliquer ainsi, au moins partiellement, l'effet bénéfique que peuvent exercer certains traitements stérilisants sur l'amélioration de la nutrition en éléments mineurs (amélioration de la nutrition en fer et en manganèse notamment). Tout à l'inverse, on peut constater dans certains cas qu'une stimulation de l'activité de la microflore peut améliorer la disponibilité de certains éléments-traces par la production de substances réductrices, complexantes (acide kétoglucannique) ou acidifiantes, issues du métabolisme microbien.

Il est bien évident que ces variations de disponibilité très discrètes et de courte durée ne peuvent être toujours suivies par la mise en œuvre de réactifs chimiques révélateurs de cette disponibilité seulement mise en évidence par le comportement de la plante.

## B. PRINCIPAUX TESTS CHIMIQUES UTILISÉS POUR CARACTÉRISER LA DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS-TRACES DU SOL.

Dans la plupart des sols, la majorité des éléments-traces n'existent dans la solution qu'à des concentrations extrêmement faibles et la plupart du temps qu'à l'état de molécules complexes dont le ligand est organique (Tableau 7). L'utilisation de l'eau comme réactif d'extraction est donc exceptionnelle et ne concerne que quelques rares éléments dont la solubilité est suffisante pour permettre un dosage de routine : c'est le cas du bore soluble à l'eau bouillante et du manganèse pour des pH inférieurs à 4,8.

TABLEAU 7. — Concentration et état de quelques éléments-traces dans la solution du sol

*Concentration levels and speciation of some micronutrients in soil solution*

Elément	Concentrations moyennes dans les solutions du sol	Principales espèces ioniques	% de l'élément complexé par la matière organique dans la solution du sol
BORE	-	$\text{BO}_3\text{H}_3$ , $\text{BO}_3\text{H}_2^-$ (pH > 9,2)	
CUIVRE	$1 \times 10^{-8}$ à $60 \times 10^{-8}$ M	$\text{Cu}^{++}$ , $\text{Cu}(\text{OH})^+$ (pH > 7,3)	98 %
FER	$1 \times 10^{-6}$ M (pH < 3)	$\text{Fe}^{+++}$ , $\text{Fe}^{++}$ , $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ (pH > 8)	
MANGANÈSE	$1 \times 10^{-6}$ à $1 \times 10^{-4}$ M	$\text{Mn}^{++}$	
MOLYBDÈNE	$2 \times 10^{-8}$ à $8 \times 10^{-8}$ M	$\text{MoO}_4^{--}$ (pH > 5), $\text{MoO}_4\text{H}^-$ (pH < 5)	
ZINC	$3 \times 10^{-8}$ à $3 \times 10^{-6}$ M	$\text{Zn}^{++}$ , $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (pH > 7)	60 %

Dans la majorité des situations, le choix du réactif fait intervenir un abaissement du pH du milieu par l'action d'acides minéraux dilués ou d'acides faibles (acide acétique) censés recréer les conditions de pH existant au niveau du système racinaire ; une approche de cet objectif est réalisée assez souvent par la mise en œuvre de mélanges tampons (généralement compris entre pH 3 et 4) destinés à compenser l'effet neutralisant du sol.

L'évaluation de la fraction dite échangeable, par analogie avec la démarche adoptée dans le cas des alcalins et alcalino-terreux, est également quelquefois prônée ; la signification de cette fraction paraît assez discutable, compte tenu du très fort pouvoir de rétention qu'exercent les sols vis-à-vis des éléments-traces.

Pour certaines conditions particulières (toxicité), il est plus vraisemblable que la fraction ainsi déterminée représente principalement la fraction soluble, la présence de la solution saline neutre utilisée ( $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$  à différentes normalités, acétate d'ammonium...) intervenant surtout en flocculant les colloïdes.

Un progrès certain a sans doute été réalisé par la généralisation progressive de l'emploi de molécules séquestrantes qui auraient un comportement plus proche de celui des systèmes racinaires dont le caractère complexant a été maintes fois démontré. Il convient cependant de remarquer que les constantes de stabilité des agents complexants utilisés (EDTA, DTPA, EDDHA) sont la plupart du temps supérieures, voire sans commune mesure avec celles des acides aliphatiques, des acides aminés ou

des acides de type gluconique excrétés par les racines (Tableau 8). L'intérêt de ces substances de synthèse réside dans leur aptitude à mobiliser préférentiellement les métaux déjà complexés du sol (par la matière organique notamment) et certainement aussi à dissoudre les oxyhydroxydes fixateurs des éléments-traces, lesquels se trouvent ainsi libérés.

TABLEAU 8. — *Logarithme des constantes de formation de quelques chélates*  
*Stability constants of some organo-metallic complexes*

	EDTA	DTPA	EDDHA	Acide citrique	Acide oxalique	Acide humique (pH 5)
Ca	11,5	11,9	8,1	4,2	3,4	2,9
Al	17,6	20,3	-	9,6	7,3	-
Fe	26,5	29,2	35,3	12,5	8,9	5,8
Zn	17,2	19,7	17,8	5,5	4,6	2,3
Cu	19,7	22,6	> 25	6,7	5,6	8,7
Mn	14,5	16,7	-	4,5	3,7	3,8
Cd	17,5	20,1	14,0	4,8	3,5	-
Ni	19,5	21,3	20,3	6,1	4,9	4,1

(NORVELL, STEVENSON et ARDAKANI, 1972)

Aux Etats-Unis, on assiste ainsi depuis plusieurs années à la généralisation de l'emploi du DTPA (acide diéthylène triaminopenta-acétique) tamponné à pH 7,3 par de la triéthanolamine. Ce réactif, utilisé systématiquement dès 1967 dans le Colorado par LINDSAY et ses collaborateurs, a permis de fixer des seuils de carence quasi officialisés aux U.S.A. : 0,6 à 0,9 ppm pour le zinc ; 4,5 ppm pour le fer ; 1 ppm pour le manganèse et 0,2 ppm pour le cuivre. L'un des reproches, déjà évoqué, que l'on peut faire à ce réactif, qui a pourtant le mérite de bénéficier d'une généralisation de plus d'une décennie pour une grande variété de sols, est de conduire à des solutions d'extraction dont la concentration en métaux est relativement faible, donc susceptible d'erreurs analytiques en routine.

Les méthodes d'extraction séquentielle, destinées à séparer les formes métalliques liées à des phases de rétention différentes, sont encore peu utilisées ; elles permettraient d'extraire sélectivement les formes solubles, échangeables, complexées et incluses dans les oxyhydroxydes. En fait, ces méthodes longues et finalement assez arbitraires sont peu envisageables en analyse de routine et ne permettent pas « a priori » de juger de la disponibilité de certaines fractions métalliques à être préférentiellement absorbées par les végétaux.

On a indiqué dans le tableau 9 la liste de quelques réactifs actuellement utilisés en France pour la détermination des seuils de carence d'un certain nombre d'éléments-traces. Il apparaît que l'emploi de l'EDTA tamponné au voisinage de la neu-



**TABEAU 9. — Liste de quelques réactifs d'extraction utilisés en France et normes d'interprétation**

*Extraction solutions utilized in France to predict micronutrient availability*

(COPPENET et JUSTE, 1979)

Elément	Réactifs d'extraction	Seuils de carence	Seuils de toxicité
ZINC	HCl 0,1 N, HCl N, EDTA	2 à 6 ppm	120
CUIVRE	HCl 1/2; EDTA; OXALATE d' $\text{NH}_4$ ; $\text{HNO}_3$ 0,4 N; Acétate d' $\text{NH}_4$	0,5 à 8 ppm	15 (acétate $\text{NH}_4$ )
BORE	Eau bouillante	0,2 à 1 ppm	2
MANGANESE	{ Acétate d' $\text{NH}_4$ , Oxalate d' $\text{NH}_4$ , EDTA Acétate d' $\text{NH}_4$ + réducteur	1 à 25 ppm	100 ppm (Ac. $\text{NH}_4$ +réducteur)
MOLYBDENE	Oxalate d'ammonium	0,15 ppm	
COBALT	Acide acétique 2,5 %	0,5 ppm	
FER	Oxalate d'ammonium	Fonction teneur en calc. actif (IPC)	

tralité manifeste une certaine tendance à se généraliser, notamment dans les régions de terroirs homogènes où le comportement des plantes commence à être assez bien connu.

### C. LES TESTS BIOLOGIQUES D'ÉVALUATION DE LA DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS-TRACES.

Le test dit de l'*Aspergillus Niger* a connu une certaine vogue aux alentours des années 1950 ; l'expérience a montré que l'utilisation de ce champignon pouvait s'avérer discutable, les quantités extraites par cet organisme à trop fort pouvoir de solubilisation étant peu compatibles avec celles effectivement mobilisées par les végétaux (Tableau 10).

Un autre mode d'évaluation biologique de la disponibilité en éléments-traces est celui qui consiste à prendre en compte la concentration de ces éléments dans le végétal, concentration qui est comparée à celles reconnues comme correspondant à des états de malnutrition. L'avantage de cette méthode est d'intégrer tous les facteurs autres que ceux caractérisant la disponibilité apparente qui est appréciée par des réactifs chimiques d'extraction. Les nombreuses observations réalisées depuis des décennies par les agronomes ont permis de réunir un certain nombre d'informations précieuses dans ce domaine (Tableau 11). L'inconvénient principal de cette démarche est bien évidemment liée au fait qu'elle ne permet de juger de la disponibilité de l'élément considéré qu'après la mise en place de la culture, ce qui amoindrit sa valeur prédictive. En outre, les seuils ainsi caractérisés sont éminemment variables en fonction des espèces et de leur stade de développement.

L'utilisation de la plante fonctionnant comme réactif d'extraction biologique pour caractériser « a priori » la disponibilité en éléments-traces d'un milieu de culture a eu, à notre connaissance, assez peu de développement, par opposition aux nombreux travaux en milieu contrôlé destiné à évaluer, par des méthodes d'épuisement ou des mesures de disponibilité en temps court (Type STANDFORT), le stock des éléments majeurs. Il y a certainement là une lacune regrettable, dont la correction aurait sans doute permis un meilleur étalonnage des méthodes chimiques d'appréciation de la disponibilité des éléments mineurs. Si l'utilisation du végétal pour caractériser l'offre initiale du sol en matière d'éléments-traces a été peu valorisée, cette méthode a été

TABLEAU 10. — Pourcentages de zinc extrait du sol par différents réactifs biologiques ou chimiques  
 Percent of soil Zn extracted from soils by several biological or chemical methods

Réactif d'extraction	Zn extrait (ppm sol)	% extrait par rap. au total	Zn extrait par un réactif Zn extrait par le maïs
Fusion alcaline	38,9	100	763
Aspergillus Niger	20,2	51,9	396
HCl 0,1 N	8,8	22,6	172
Acétate NH <sub>4</sub> + Dithizone	2,7	6,9	33
MgSO <sub>4</sub> 0,2 M	0,2	0,5	4
Maïs	0,051	0,13	1

(VIETS F.G. Jr., 1967)

TABLEAU 11. — Ordre de grandeur des seuils de carence en éléments-traces dans les végétaux (ppm/matière sèche)  
 Mean values of critical deficiency levels of micronutrients in plants

BORE	20
CUIVRE	3 - 5
FER	20
MANGANÈSE	20
MOLYBDÈNE	0,07 - 0,10
ZINC	15
COBALT *	0,05
SELENIUM *	0,1
VANADIUM	0,002

\* Seuils en-deçà desquels il y a risque de carence chez les ruminants consommant le végétal. (COPPENET et JUSTE, 1979)

par contre plus largement employée pour définir les seuils de phytotoxicité, le stock d'éléments étant alors augmenté par des ajouts progressifs de composés solubles de ces derniers jusqu'à ce que les effets toxiques (appréciés par une chute de rendement) se manifestent. Le tableau 12 montre qu'il est ainsi possible de faire apparaître des seuils de toxicité dans le sol et des teneurs critiques dans le végétal, éventuellement transposables pour diagnostiquer des toxicités sur le terrain ; il est clair que ces seuils et ces teneurs n'auront de signification généralisable que si l'élément toxique expérimenté constitue le seul facteur limitant la croissance de la plante, l'intervention d'autres facteurs limitants pouvant déplacer considérablement seuils et teneurs critiques.

TABLEAU 12. — *Seuils de phytotoxicité de quelques éléments-traces dans deux types de sol*  
(Quantité totale de l'élément, en ppm)

*Critical phytotoxicity levels of some micronutrients in two soils differing in their cation exchange capacity*

	Métal introduit sous forme de sel		Métal introduit sous forme de boue	
	Ray-grass	Radis	Ray-grass	Radis
<u>Sol limoneux</u>				
. Zinc	500	$0 < x < 125$	125	125
. Nickel	25	$0 < x < 25$	50	$0 < x < 25$
. Plomb	$x > 200$	$x > 200$	$x > 200$	$x > 200$
. Mercure	$x > 5$	$x > 5$	2	$x > 5$
. Cadmium	1	$> 10$	$> 10$	5
<u>Sol sableux</u>				
. Zinc	250	$0 < x < 125$	125	125
. Nickel	$0 < x < 25$	$0 < x < 25$	$> 100$	75
. Plomb	150	100	$> 200$	150
. Mercure	$> 5$	$> 5$	$> 5$	$> 5$
. Cadmium	2	5	$> 10$	$> 10$

(GOMEZ et al. 1982)

#### D. CAS PARTICULIER DE L'APPRECIATION DE LA DISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS-TRACES PRÉSENTS DANS CERTAINS AMENDEMENTS ORGANIQUES.

Cette préoccupation prend actuellement de l'importance en raison de la généralisation de l'emploi en agriculture de déchets organiques des activités urbaines ou agricoles (boues de station d'épuration, composts d'ordures ménagères, lisiers) dont une des caractéristiques est de contenir des quantités importantes d'éléments-traces.

La prédiction de cette disponibilité peut être approchée en assimilant le déchet organique à un sol ou à un support de culture, justiciable alors des méthodes d'évaluation employées pour les sols. Compte tenu de la richesse élevée de ces matériaux en matière organique, la préférence semblerait devoir être donnée, dans ce

cas, à l'utilisation de réactifs chimiques d'extraction sélectivement plus actifs vis-à-vis des fractions métalliques retenues par la matière organique (agents complexants). En fait, une expérience mettant en œuvre 11 échantillons de boues de station d'épuration de même origine, mais qui ont subi différents types de traitement biologique ou de conditionnement, a clairement démontré que l'acide chlorhydrique 0,1 N est le plus apte à rendre compte de la disponibilité pour le maïs d'un certain nombre d'éléments-traces contenus dans ces boues (Tableau 13).

**TABLEAU 13. — Corrélation entre extractibilité chimique et extractibilité biologique des métaux présents dans des boues de station d'épuration**

*Correlation between chemical and biological extractibility of heavy metals in sewage sludges*

Métal extrait par le maïs	Métal extrait par les réactifs			Métal extrait par HCl 12 N bouillant
	KCl 0,1 N	DTPA M	HCl 0,1 N	
Fe	- 0,215	- 0,420	0,167	- 0,322
Zn	0,983***	0,824***	0,825***	0,715***
Mn	0,740**	< 1,10 <sup>-3</sup>	0,375	- 0,675*
Cu	0,055	0,267	0,701**	- 0,288
Cd	-	0,576*	0,934***	- 0,286
Ni	0,047	0,196	< 1,10 <sup>-3</sup>	- 0,175

\* : corrélation significative au seuil de 5 %  
 \*\* : corrélation significative au seuil de 1 %  
 \*\*\* : corrélation significative au seuil de 0,1 %.

(M. LINERES et C. JUSTE, 1980)

Ce résultat d'expérience ne doit pas faire perdre de vue qu'il s'agit, dans ce cas, d'une évaluation de la disponibilité en temps court des éléments-traces contenus dans le matériau organique avant son introduction dans le sol : l'évolution ultérieure de ce dernier après incorporation dans le sol est d'autant plus difficilement prévisible à long terme que les constituants organiques entrant dans sa composition sont susceptibles de transformations rapides. Le problème se pose en termes comparables pour les effluents liquides riches en éléments-traces (lisiers de porcs, par exemple) dont la spécialisation est encore peu connue.

## E. CONCLUSION.

La prédiction de la disponibilité pour les végétaux des éléments-traces contenus ou ajoutés au sol sous différentes formes représente l'un des problèmes les plus complexes auxquels se trouvent actuellement confrontés les agronomes.

Cette complexité repose en partie sur l'extrême modicité des quantités d'éléments mises en jeu ; elle est attribuable aussi à une insuffisance manifeste des connaissances dans le domaine du comportement des éléments-traces dans le sol,

notamment en ce qui concerne leur libération à partir des minéraux primaires, leur intégration dans les systèmes carbonatés ou les oxyhydroxydes et le rôle que peuvent jouer les ligands organiques auxquels ils sont associés dans ces phénomènes.

Il est clair que, tant que ces connaissances concernant l'offre du sol en éléments-traces n'auront pas progressé, la seule solution d'attente à proposer est celle qui consiste à s'engager, à l'échelle du plus grand nombre de pays, dans la voie d'une standardisation rigoureuse des méthodes d'évaluation déjà existantes de la disponibilité de ces éléments.

---

### SUMMARY

#### AVAILABILITY OF SOIL AND ORGANIC FERTILIZER MICRONUTRIENTS

*Several problems are encountered in the evaluation of the micronutrients availability in soils or some organic materials : metal speciation (t. 1), very low level concentration in plants (t. 2, 3, 4), antagonistic effects with other minor or major elements (t. 5, 6), rapid variations of the trace elements mobility in the rhizospheric sites.*

*In the soil solutions, micronutrients exist at very low level concentration, chiefly as organic mineral complex molecules (t. 7). Several extraction solutions are utilized: hot water, acetic acid, ammonium acetate, acetic acid mixtures, neutral salts, mineral acids at various rates of dilution and, more recently, complexing molecules as EDTA, DTPA, EDDHA. (t. 8, 9).*

*Biological methods including Aspergillus Niger test (t. 10) or the critical level evaluation of metal in the plant tissues are also frequently employed (t. 11, 12).*

*In some organic fertilizers as sewage sludge or town refuse composts, complexing agents are chiefly utilized but in some cases mineral acids (as diluted HCl) can be successfully employed for the prediction of the minor element availability (t. 13).*

*One of the greatest actual difficulties encountered in the study of micronutrients is that different methodologies have been utilized for analysis in the world: the standardization of these methodologies should be rapidly realized.*

## Références bibliographiques

- COPPENET M., CALVEZ J. (1967). — Les oligo-éléments et en particulier le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. C.R. Acad. Agric., **53**, 939-947.
- COPPENET M., JUSTE C. (1979). — Oligo-éléments indispensables à la vie des plantes. Phénomènes de toxicité, 408-415 - in Pédologie, tome 2, Constituants et propriétés des sols, 459 p., Masson.
- GOMEZ A., JUSTE C., NICIBAR B., LESSART P., HERES A., ALEXANDRE D. (1982). — Définition des seuils de phytotoxicité de différents métaux susceptibles d'être rencontrés dans les boues de station d'épuration pour des sols à très faible ou à très fort pouvoir de fixation vis-à-vis des cations. C.R. Convention d'Etude n° 79-81, M.U.L.-I.N.R.A.-C.E.A., 108 p.
- GUILLET B., JEANROY E., ROUGIER C., SOUCHIER B. (1980). — Le cycle biogéochimique et la dynamique du comportement des éléments-traces (Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr) dans les pédogenèses organiques acides. Rapport A.T.P. « Formation et distribution des gisements ». Note Techn. et Sci. du Centre de Pédologie, Nancy, n° 27, 49 p.
- JUSTE C., DELAS J., TAUZIN J. (1971). — Carence en soufre de la Luzerne en sol de Charente. III. Interaction soufre-molybdène dans un essai réalisé en vases de végétation. C.R. Acad. Agric., **57**, 1134-1139.
- LINDSAY W.-L. (1972). — Inorganic phase equilibria in soils. In Micronutrients in Agriculture, p. 41-57. Proc. of a Symp. held at Muscle School, Alabama, 20-22 April 1971.
- LINERES M., JUSTE C. (1980). — Mise au point de tests agronomiques permettant d'apprécier simultanément la phytotoxicité globale des boues de station d'épuration et la disponibilité pour les plantes des métaux qu'elles contiennent. C.R. Convention d'Etude M.E.C.V.-I.N.R.A., n° 77-145, 26 p.
- LUBET E., SOYER J.-P., JUSTE C. (1983). — Appréciation de l'alimentation en zinc du Maïs par la détermination du rapport Fe/Zn dans les parties aériennes du végétal. Agronomie, **3**, 1, 45-50.
- NORVELL W.-A. (1972). — Equilibria of metal chelates in soil solution. In Micronutrients in Agriculture, p. 115-138. Proc. of a Symp. held at Muscle School, Alabama, 20-22 April 1971.
- STEVENSON F.-J., ARDAKANI M.-S. (1972). — Organic matter reaction involving micronutrients in soils. In Micronutrients in Agriculture, p. 79-110. Proc. of a Symp. held at Muscle School, Alabama, 20-22 April 1971.
- TROCME S. (1970). — Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments. Ann. Agron., **21**, 519-548.
- VIETS F.-G. Jr. (1967). — Soil testing for micronutrients cations, p. 55-69. In Soil Testing and Plant Analysis; Ed. Soil Sci. Soc. of America, I.N.C., Publisher, Madison.