

# II – Les oligo-éléments et leur importance sur la production agricole et l'alimentation humaine

*Animatrice :*  
*Aurélia Michaud - Ingénieur - INRAE*

*Animateur Chat :*  
*Matthieu Bravin - Chercheur - Cirad*



- **Introduction : Rôle des oligo-éléments en alimentation humaine**  
Christine Feillet-Coudray - Directrice de recherche - INRAE
- **Teneurs en oligos dans les tissus végétaux : conséquences pour la production agricole et l'alimentation humaine**  
Lionel Jordan-Meille - Enseignant-Chercheur - Bordeaux Sciences Agro – UMR ISPA  
(Interactions Sol Plante Atmosphère)
- **Cas d'étude 1 : Exemple de carence en Mn sur blé**  
Christine le Souder - Ingénieure spécialisée en fertilisation - Arvalis-Institut du Végétal
- **Cas d'étude 2 : Sols sableux landais : problématiques Cu, Mn, cultures légumières, grandes cultures**  
Justine Sourisseau - Conseillère grandes cultures, chargée d'expérimentation - Grceta-Sfa  
(Groupement de Recherche sur les Cultures et Techniques Agricoles des Sols Forestiers d'Aquitaine)
- **Cas d'étude 3 : Exemple de carence en Mn en arboriculture**  
Alain Kleiber - Responsable technique du pôle agriculture - Aurea AgroSciences
- **Synthèses sur les cas d'études et éléments de généricité**  
Lionel Jordan-Meille - Enseignant-Chercheur - Bordeaux Sciences Agro - UMR ISPA  
(Interactions Sol Plante Atmosphère)

# II – Les oligo-éléments et leur importance sur la production agricole et l'alimentation humaine

---

- **Synthèses sur les cas d'études et éléments de généricité**

**Lionel Jordan-Meille** - Enseignant-Chercheur - Bordeaux Sciences Agro –  
UMR ISPA (Interactions Sol Plante Atmosphère)

# Conclusions sur les cas d'études, fiches de synthèse



Guide Fertilisation Raisonnée, COMIFER  
**Blocage Mn**  
Stratégie corrective

Spécificités ~ plante



Guide de poche illustré, KAU  
**Blocage Mn**  
Stratégies +/- long terme

Spécificités ~ OE

Carence vraie Cu  
Apports de fond

Plan :

- Sensibilité des espèces aux carences (fréquence, intensité)
- Facteurs influence sur extractabilité des OE : blocage ou carence ?
- Place de la symptomatologie dans la gestion des risques de carences
- Des outils de diagnostic à adapter : analyses sol – analyses plante
- Réponses techniques aux carences en OE
- Biofortification : exemple du zinc

# Principales carences en oligo-éléments observées en grandes cultures

| Carence           | Manganèse |           | Cuivre    |           | Zinc      |           | Bore      |           | Molybdène |           | Fer       |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | Fréquence | Intensité |
| Blé tendre        | ★★        | ★★★★      | ★         | ★★★★      | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Orge              | ★★        | ★★★★      | ★         | ★★★★      | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Maïs              | ★         | ★★        | (★)       | ★★        | ★         | ★★★★      | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Colza             | (★)       | ★         | 0         | 0         | 0         | 0         | ★         | ★★        | ★         | ★★        | 0         | 0         |
| Tournesol         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | ★★        | ★★        | ★         | ★★        | 0         | 0         |
| Betterave         | ★         | ★★        | 0         | 0         | 0         | 0         | ★         | ★★★★      | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Lin               | 0         | 0         | 0         | 0         | ★         | ★★★★      | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Pomme de terre    | (★)       | ★         | 0         | 0         | (★)       | ★         | (★)       | ★★        | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Pois de printemps | (★)       | ★         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | (★)       | ★         | ★         | ★★        |
| Féverole          | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | ★         | ★★        | 0         | 0         | 0         | 0         |
| Soja              | (★)       | ★         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | ★         | ★★        |

### Fréquence

- ★★★★ Très fréquent
- ★★★ Fréquent
- ★★ Assez fréquent
- ★ Rare
- (★) Exceptionnel
- 0 Absent

### Intensité (dégâts)

- ★★★ Dégâts élevés.
- ★★ Quelques quintaux
- ★ Symptômes visuels sans conséquence
- (★) Quelques symptômes visuels fugaces
- 0 Aucun dégât

Sources des données : Arvalis, Terres Inovia, ITB

# Principales carences en oligo-éléments observées en arboriculture et viticulture



| Carence<br>Culture (*) | MANGANESE |           | FER       |           | BORE      |           | ZINC      |           | MOLYBDENE |           | CUIVRE    |           |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        | Fréquence | Intensité |
| Vigne de cuve          | ***       | ***       | ***       | ***       | ***       | **        | *         | *         | *         | *         | *         | *         |
| Abricotier             | **        | **        | **        | **        | ***       | **        | **        | **        | *         | *         | *         | **        |
| Actinidia (kiwi)       | ***       | ***       | ***       | ***       | **        | *         | **        | *         | *         | *         | *         | *         |
| Agrumes                | **        | **        | **        | **        | **        | *         | ***       | **        | *         | *         | **        | *         |
| Amandier               | **        | *         | **        | *         | ***       | **        | **        | *         | *         | *         | *         | *         |
| Cerisier               | **        | **        | **        | **        | **        | *         | **        | *         | *         | *         | *         | *         |
| Noisetier              | **        | **        | **        | *         | **        | *         | *         | *         | *         | *         | *         | *         |
| Noyer                  | **        | *         | ***       | **        | **        | *         | **        | *         | *         | *         | *         | *         |
| Pêcher                 | ***       | **        | ***       | **        | **        | **        | **        | **        | *         | *         | **        | *         |
| Poirier                | ***       | ***       | ***       | **        | **        | *         | **        | *         | *         | *         | *         | *         |
| Pommier                | **        | **        | **        | **        | ***       | **        | **        | **        | *         | *         | *         | *         |
| Punier                 | ***       | **        | ***       | **        | **        | **        | **        | **        | *         | *         | *         | *         |
| Vigne de table         | ***       | **        | ***       | **        | **        | **        | **        | **        | *         | *         | *         | *         |

(\*) à raisonner en fonction de la variété et du porte greffe

|     | Fréquence     | Intensité (dégats) |
|-----|---------------|--------------------|
| *** | très fréquent | Forte              |
| **  | fréquent      | Moyenne            |
| *   | peu fréquent  | Faible             |



# Principales carences en oligo-éléments observées en cultures maraichères

|            | fer | manganèse | cuivre | zinc | bore | molybdène |
|------------|-----|-----------|--------|------|------|-----------|
| Artichaut  |     |           |        |      |      |           |
| Asperge    |     |           |        |      |      |           |
| Broccoli   |     |           |        |      |      |           |
| Céleri     |     |           |        |      |      |           |
| Chou       |     |           |        |      |      |           |
| Chou-fleur |     |           |        |      |      |           |
| Concombre  |     |           |        |      |      |           |
| Carotte    |     |           |        |      |      |           |
| Épinard    |     |           |        |      |      |           |
| Haricot    |     |           |        |      |      |           |
| Laitue     |     |           |        |      |      |           |
| Melon      |     |           |        |      |      |           |
| Navet      |     |           |        |      |      |           |
| Radis      |     |           |        |      |      |           |
| Tomate     |     |           |        |      |      |           |

Espèces moyennement sensibles aux baisse de biodisponibilité des OE

Espèces très sensibles aux baisse de biodisponibilité des OE

# Conditions ou facteurs intervenant dans la réduction de la biodisponibilité des oligo-éléments



« L'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires Guide d'interprétation », ARVALIS, 2020

|           | Climatiques                   | Etat chimique du sol  | Pratiques culturales   |
|-----------|-------------------------------|---|--|
| Manganèse | Sécheresse automne, hiver (★) | pH <sub>eau</sub> > 6.8 (★★★★)<br>Sol riche en sables grossiers (★★★).<br>Sol riche en matière organique (★★★).<br>Sol léger, aéré, soufflé (★★★) | Travail du sol trop fin et trop profond (★).<br>Chaulage (★) |
| Cuivre    |                               | pH <sub>eau</sub> > 6.8 (★★)<br>Sol riche en matière organique (★★★★)<br>Teneur très élevée en phosphore assimilable (★)                          | Chaulage (★)   |
| Zinc      | Printemps froids (★)          | pH <sub>eau</sub> > 7 (★★★)<br>Teneur très élevée en phosphore assimilable (★)  | Apports importants d'engrais phosphatés (★)<br>Chaulage (★)  |
| Bore      | Sécheresse (★★)               | pH <sub>eau</sub> > 7 (★★★)<br>Sols riches en calcaire actif (★★★)<br>Sol sableux (★★★)<br>Sol pauvre en matière organique < 2 % (★★)             | Chaulage (★)   |
| Molybdène |                               | pH acide (★★★★)<br>Sol pauvre en matière organique (★)  |  |
| Fer       | Sols froids et humides (★★)   | Sol riche en calcaire actif (★★★★)  | Variétés sensibles (★★)                                      |

\*\*\*\* très forte incidence à \* faible incidence



# Gestion des carences : une approche privilégiant l'analyse des risques

L'ESPECE cultivée est-elle sensible ?



Le SOL est-il correctement pourvu ?



Quels sont les risques de BLOCAGE au sol ?



Le CLIMAT accentue-t-il les risques ?



L'ETAT VEGETATIF accentue-t-il les risques ?

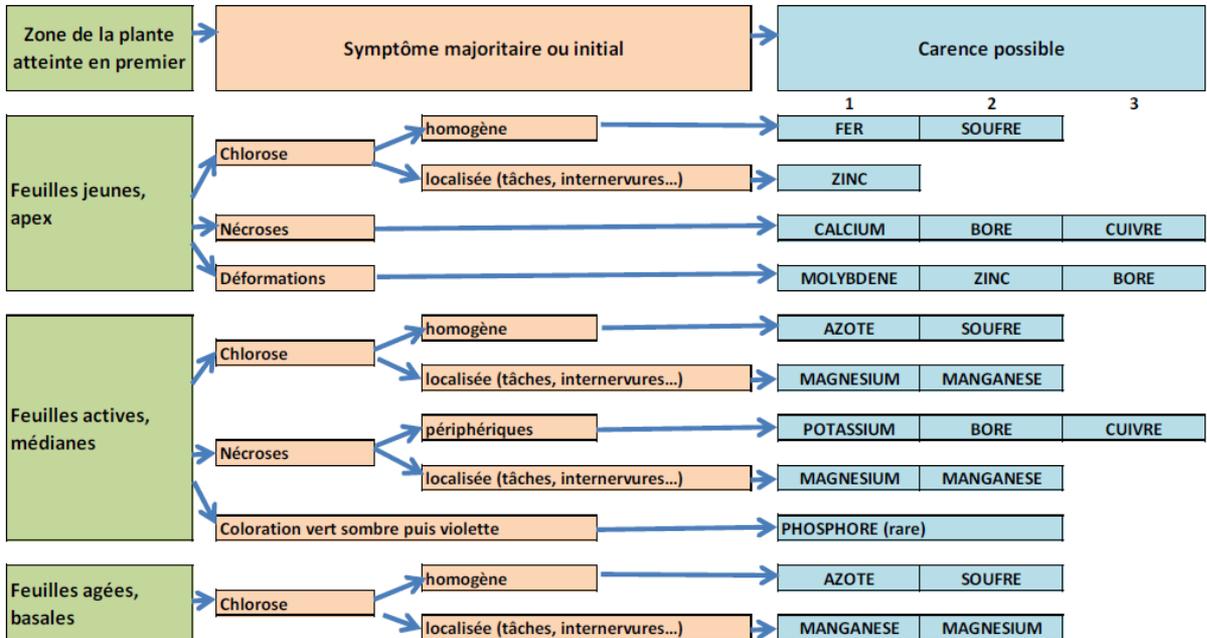


La NUTRITION est-elle équilibrée ?



Y a-t-il des SYMPTOMES ?

# Gestion des carences : une approche privilégiant la symptomatologie



X

- Sensibilité de la culture
- Etat du système racinaire
- Histoire culturale récente
- Interventions : herbicides, ...
- Climat de l'année.
- Etat sanitaire de la plante
- Analyse de terre récente

⇒ Considérer le couple [culture] x [conditions de milieu]

## I. Absence d'extractant universel

- EDTA ..... Zn, Cu, Zn, Mn
- DTPA ..... Zn, Cu, Fe, Mn
- CaCl<sub>2</sub> ..... B
- « Eau bouillante »..... B
- CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> ..... Mo
- NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub>

## II. Conditions de la pertinence de l'analyse de terre

- Risque avéré de carence vraie (X Fe)
- Indicateur « sol » fiable ( $\Delta$  biodisponibilité Mn  $\sim \Phi_{\text{rédox}}$ )  
([Mo] trop faibles)
- Indicateur bien référencé,
- Intégration des interactions biogéochimiques



Teneur en MO (Cu)  
 Texture (Cu, B)  
 Valeur du pH (Zn)  
 Teneur en calcaire (B)

# Diagnostic des carences : problématique des analyses de terre



|           | Pertinence (1) | Précision (2) | Seuil de risque de carence  |
|-----------|----------------|---------------|---|
| Manganèse | ★              | ★             | < 10 ppm (extraction avec EDTA) <span style="float: right;">Problématique du potentiel rédox</span>   |
| Cuivre    | ★★             | ★★            | Le ratio Cu EDTA (ppm)/teneur en matière organique du sol (%) détermine le risque de carence. Ce ratio dépend du type de sol : < 0.4 en sols argilo calcaires ; < 0.5 en limons caillouteux ; < 1 en limons.  |
| Zinc      | ★★             | ★             | < 1 mg/kg pour pH <sub>eau</sub> < 6.2.<br>< 2 mg/kg pour pH <sub>eau</sub> > 6.2.  |
| Bore      | ★★             | ★★            | <p><b>Seuil de carence colza</b> (Source Terres Inovia - méthode eau chaude) :<br/>Un sol qui contient 0,3 à 0,8 ppm de bore est en général bien pourvu hormis dans les situations argilo-calcaires où une valeur supérieure à 1,2 ppm serait souhaitable.</p> <p><b>Seuil de carence tournesol</b> (Source Terres Inovia) : 0.2 à 0.6 ppm selon méthode d'extraction, pH, et type de sol (voir tableau 23).</p> <p><b>Seuil de carence betterave</b> (Source ITB - méthode extraction CaCl<sub>2</sub>, méthode "eau bouillante")<br/>- &lt; 0.2 ppm : risque élevé dans toutes situations.<br/>- &gt; 0.4 à 0.5 ppm : risque faible, à l'exception des sols sableux ou ayant reçu un chaulage récent.</p> |
| Molybdène | (★)            | (★)           | Les teneurs en molybdène au niveau du sol sont faibles (0,1 à 2 ppm) et difficiles à interpréter.   |
| Fer       | (★)            | (★)           | Il est très rare qu'une chlorose ferrique soit causée par une déficience effective du sol en fer (carence vraie)  |

(1) Pertinence : indicateur de lien avec déficience sur la plante - fort ★★ à nul (★)

(2) Précision (robustesse) : lien avec le contexte pédoclimatique - établi ★★ à non référencé (★)

« L'analyse de terre pour les grandes cultures et les prairies temporaires  
Guide d'interprétation », ARVALIS, 2020

# Diagnostic des carences : problématique des analyses de plante



|                 | mg / kg    |
|-----------------|------------|
| Fe .....        | 50-150     |
| Mn .....        | 10-20      |
| <i>Cu</i> ..... | <i>3-5</i> |
| Zn .....        | 15-20      |
| Mo .....        | 0,1-1      |
| B .....         | 5-80       |

Concentrations « moyennes »  
 critiques de carences

{ Espèce  
 Organe  
 Stade (âge)  
 Nutrition N

## Type carence

Espèce  
(pérenne / annuelle)

Redressement / Entretien / Préventif ?

Formes chimiques ?

Sol vs foliaire ?

Périodicité ?

Stade ?

Doses ?

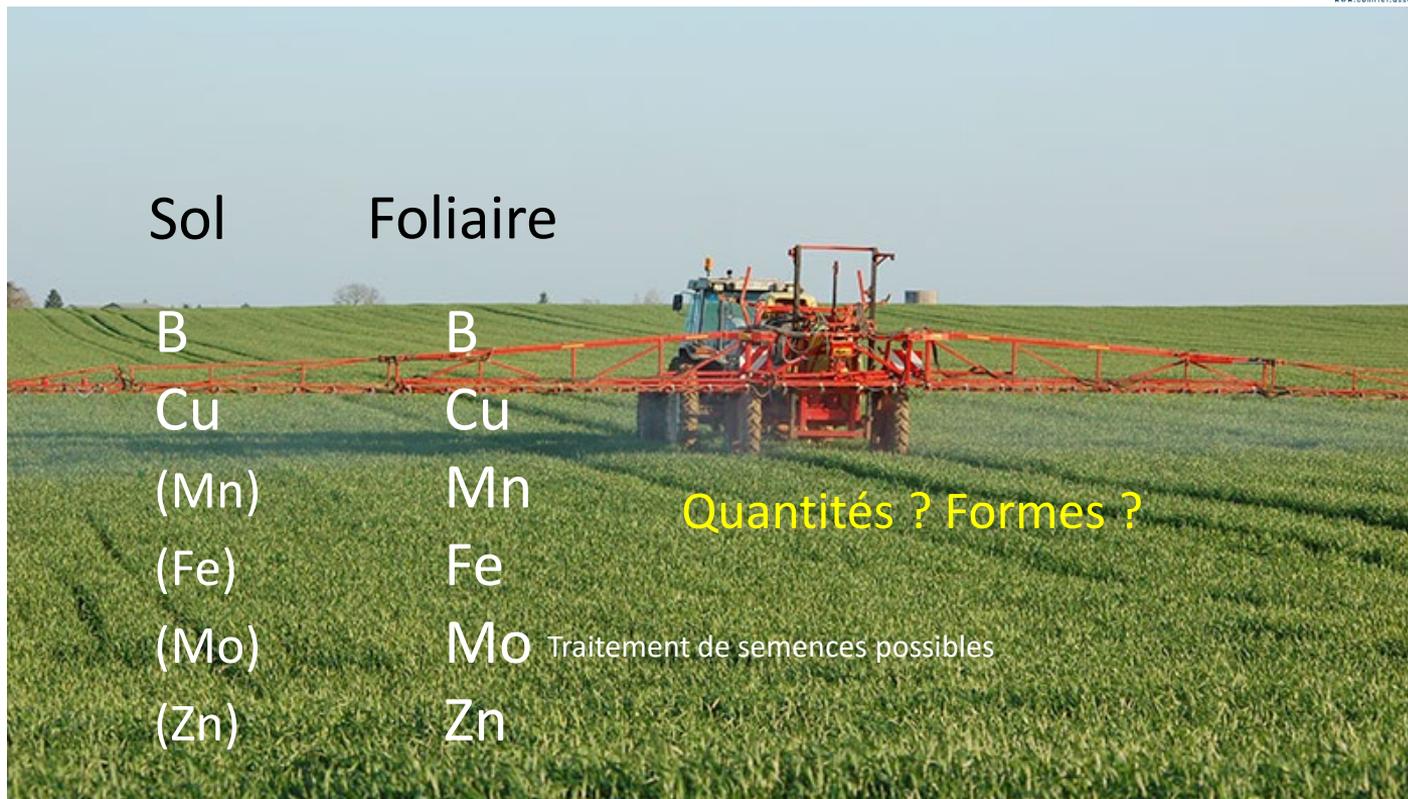
Conditions milieu (pH)

Biogéochimie  
de l'OE

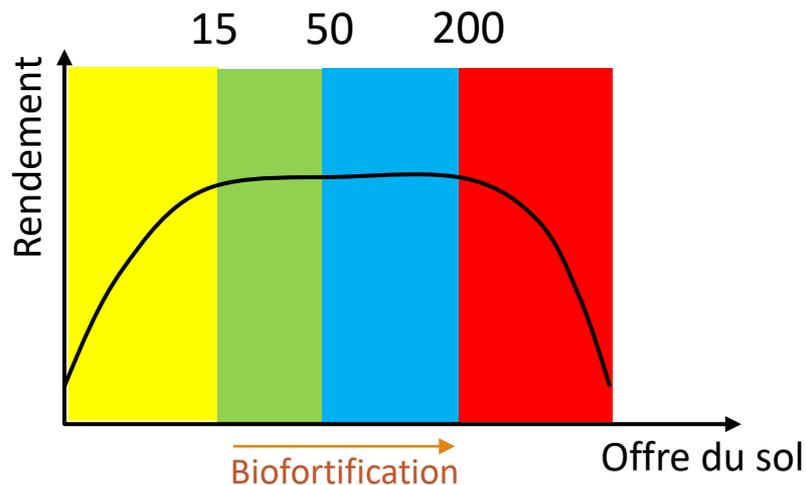
Mobilité de l'OE  
dans le phoème

Teneur en  
OE extractible

# Méthodes de correction



# La biofortification en oligoéléments : objectifs, démarches, résultats : exemple du Zn



Déficiência Rendement et santé

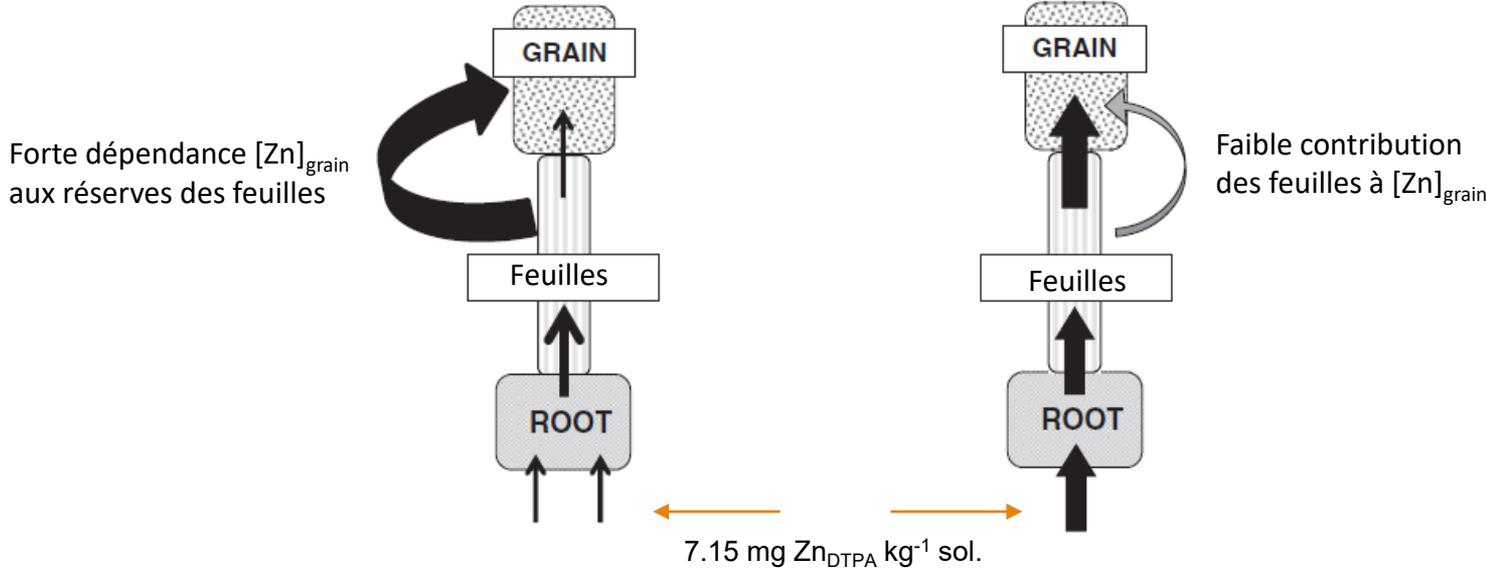
Déficiência santé, optimum rendement

Optimum santé et rendement

Toxicité rendement

⇒ Optimum agronomique < optimum santé

# La biofortification en oligoéléments : objectifs, démarches, résultats : exemple du Zn

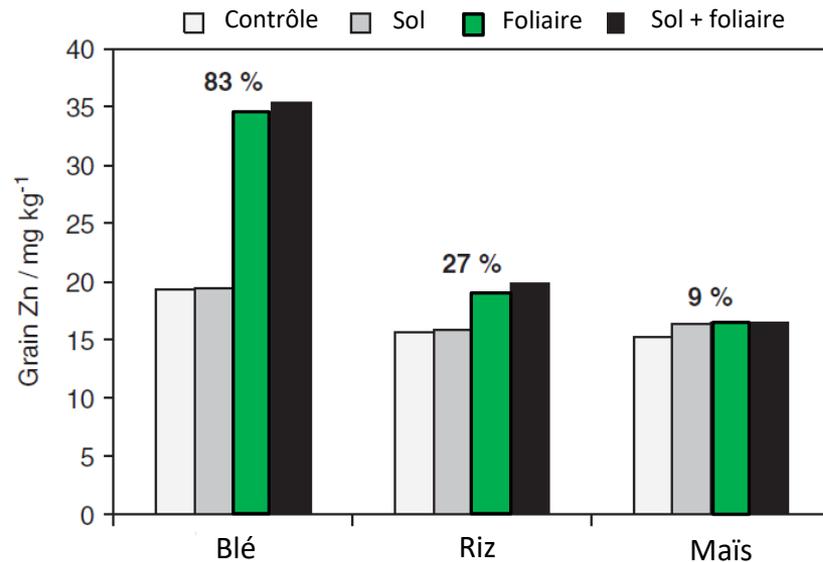


Cakmak et Kutman, 2018 doi: 10.1111/ejss.12437  
 Liu et al. 2019 doi: 10.3389/fpls.2019.00426

⇒ Les possibilités de translocation peuvent compenser les défaut d’approvisionnement du sol

# La biofortification en oligoéléments : objectifs, démarches, résultats : exemple du Zn

- ⇒ Applications foliaires plus efficaces
- ⇒ Réponses espèces-dépendantes
- ⇒ Coût négligeable ( $ZnSO_4$ ) si application liée à autre intervention
- ⇒ Interactions positives avec nutrition N (prélèvement et translocation)
- ⇒ Efficacité d'autant meilleure qu'application tardive (remplissage)
- ⇒ Antagonismes sur translocation Cd – Zn
- ⇒ Des grains enrichis assurent une meilleure reprise



Carences en Mn sur céréales (avoine > blé > orge > seigle), en bore sur tournesol et betterave

Carences en Mn, Fe, Bo et Zn en viticulture et arboriculture

Carences en Fe sur protéagineux (pois, soja)

Blocages ( $\leftrightarrow$  drainage, élévation pH, sols « soufflés »)  $\neq$  carences vraies

Analyse sol pour Mn et Mo peu fiable

Efficacité des corrections par applications foliaires

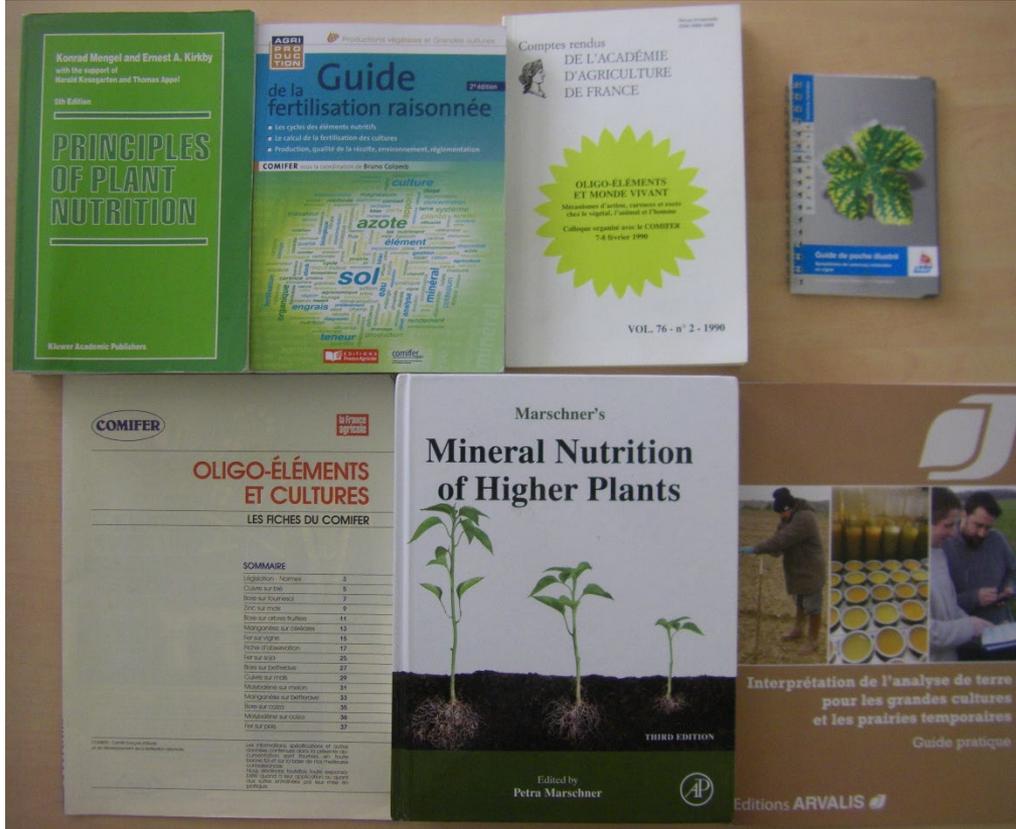
Eviter les cocktails d'OE

A l'exception du Mo, le pH élevé est un facteur prépondérant des faibles  $[OE]_{\text{extractibles}}$

Synergies / antagonismes avec MO, N, P, autres OE ...

Perspectives de la biofortification en Zn sur les populations déficientes

# Ouvrages / articles consultés



## Zinc Uptake, Translocation, and Remobilization in Winter Wheat as Affected by Soil Application of Zn Fertilizer

Dun-Yi Liu<sup>1,2,3</sup>, Yu-Min Liu<sup>1</sup>, Wei Zhang<sup>1,2,3</sup>, Xin-Ping Chen<sup>2,3</sup> and Chun-Qin Zou<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Center for Resources, Environment and Food Security, China Agricultural University, Beijing, China, <sup>2</sup> Chongqing Key Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing, China, <sup>3</sup> Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing, China

### European Journal of **Soil Science**

European Journal of Soil Science, January 2018, 69, 172–180

doi: 10.1111/ejss.12437

#### Special issue article

#### Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review

I. CAKMAK<sup>1</sup> & U. B. KUTMAN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Universite Street, 34956, Istanbul, Turkey, and <sup>2</sup>Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Architecture, Konya Food and Agriculture University, Beysehir Street, 42080, Konya, Turkey