

MONOGRAPHIE

# FERRILENE

Prévient et corrige la chlorose ferrique





pag. 4	<b>PROFIL DE L'ENTREPRISE</b>
pag. 6	<b>1 FER</b>
	1.1 Le fer dans la nature
	1.2 Le fer dans le sol
	1.3 La chimie du fer
	1.4 Des aspects sur la carence en fer
	1.5 Les facteurs principales qui affectent la disponibilité du fer
	1.5.1 La solubilité du fer dans le sol
	1.5.2 La présence de bicarbonates [pH]
	1.5.3 L'interaction du fer et des autres éléments
pag. 12	<b>2 LE FER DANS LES PLANTES</b>
	2.1 L'absorption
	2.2 Stratégies d'absorption
	2.2.1 Stratégie I
	2.2.2 Stratégie II
	2.3 Le transport du fer dans les plantes
	2.4 Fonctions biologiques du fer dans les plantes
pag. 19	<b>3 LA CHLOROSE FERRIQUE</b>
	3.1 La chlorose ferrique
	3.2 Symptômes visibles
	3.4 Comment corriger la chlorose ferrique
pag. 22	<b>4 CHÉLATES</b>
	4.1 Les molécules chélatants
	4.2 Stabilité des chélates du fer
	4.3 Qualité des chélates
	4.4 Les chélates du fer et leur usage dans l'agriculture
	4.5 Les agents chélateurs de la gamme Ferrilene
pag. 26	<b>5 GAMME FERRILENE</b>
	5.1 Histoire des agents chélateurs
	5.2 FERRILENE 4.8 et FERRILENE
	5.3 FERRILENE TRIUM
pag. 30	<b>6 L'APPROCHE PHÉNOMIQUE</b>
pag. 37	<b>7 ESSAIS AGRONOMIQUES</b>
pag. 48	<b>8 BIBLIOGRAPHIE</b>

## Profil de l'entreprise

### MISSION

Créer un avenir durable pour l'homme et la nature.

### VISION

Chez Valagro, nous vivons dans un état d'esprit de troisième voie, qui consiste à rechercher l'excellence et à appliquer la science à l'agriculture pour produire des aliments plus nombreux et plus sains, en ayant à cœur la durabilité.

### VALEURS

**Intégrité** - Nous agissons avec honnêteté, en respectant les personnes et la nature.

**Passion** - Nous construisons, tout en étant responsables de l'avenir durable.

**Confiance** - Nous créons des relations basées sur le fait de faire ce que nous disons.

**Relations** - Nous voyons la situation globale tout en reconnaissant la contribution individuelle.

**Mentalité d'innovation** - Nous créons des solutions avec courage, curiosité et détermination.

### CULTURE DE L'ENTREPRISE

Nous nous concentrons sur la remise en question de ce qui a déjà été fait.

Nous associons l'expertise et le sens des affaires à d'excellents résultats dans la recherche constante de l'excellence.

Nous travaillons pour que l'impossible devienne réalité.

Pour ceux qui sont curieux et ne cessent d'apprendre, ceux qui supportent le changement avec courage et ceux qui restent ouverts aux nouvelles idées.

Pour ceux qui peuvent transférer leurs valeurs aux autres en respectant toujours la diversité tout en tirant parti de l'intégration.

Utiliser la science pour exploiter le potentiel de la nature dans un souci de durabilité environnementale : tel est le principe sur lequel repose GeaPower. Il s'agit de la plateforme **technologique exclusive** développée par Valagro pour transformer des ingrédients actifs potentiels en solutions nutritives de haute qualité.

Grâce à GeaPower, nous pouvons proposer des solutions basées sur l'innovation durable qui, en utilisant les **technologies les plus modernes**, empruntent à la nature de précieux ingrédients actifs et les restituent à la nature elle-même pour obtenir des récoltes **plus saines, plus riches et meilleures**.

GeaPower reduce  
el coste de llevar  
una solución al  
mercado a la vez  
que garantiza una  
eficacia constante.



#### CONNAISSANCE APPROFONDIE DES INGREDIENTS ACTIFS ET DES MATIÈRES PREMIÈRES

Cette connaissance permet à Valagro d'identifier, de caractériser et de préserver les ingrédients actifs spécifiques qui sont censés provoquer les réponses physiologiques recherchées.



#### DES PROCÉDÉS D'EXTRACTION EXCLUSIFS

Les processus d'extraction spécifiques et adaptés permettent de garantir les bons ratios de chaque ingrédient dans les différents mélanges de composants naturels.



#### UNE RECHERCHE DE POINTE ET DES COMPÉTENCES ANALYTIQUES

- Le recours à la génomique, la protéomique et la métabolomique permet de décoder les déclencheurs génétiques et moléculaires des réponses physiologiques spécifiques dans les systèmes végétaux.
- Screening de centaines d'échantillons par essai.



#### CAPACITÉ AVERÉE À FOURNIR DES SOLUTIONS EFFICACES

- Nombreux résultats d'essais et d'expérimentations dans le monde entier.
- Les approches commerciales et les approches de R&D sont liées et interdépendantes.
- Permet à Valagro d'accélérer le travail sur les prototypes avec la meilleure chance d'atteindre la viabilité commerciale.



1

Fer

Alberto Stivaletta, Alessandro De Marco - Global Research

### 1.1 Le fer dans la nature

Selon l'état redox, le fer se trouve dans la nature sous la forme Fe<sup>3+</sup> [ferrique] ou Fe<sup>2+</sup> [ferreux]. Après Si, O et Al, le fer est l'élément le plus abondant dans le noyau terrestre, avec une teneur d'environ 5,1%, tandis que dans le sol, on estime que la teneur moyenne est de 3,8 % [Lindsay 1979]. Le fer est généralement présent dans le sol en quantité suffisante pour former divers composés, le plus souvent sous forme d'oxydes et d'hydroxydes. La couleur du sol est principalement basée sur la présence d'oxydes libres. Les couleurs jaune-brun des zones froides/tempérées sont dues à la présence d'hydroxydes tels que la goethite. Les couleurs rouges des régions arides sont dues à des oxydes non hydratés comme l'hématite.

### 1.2 Le fer dans le sol

La majeure partie du fer se trouve dans les structures cristallines de nombreux minéraux et dans les nappes phréatiques. L'altération des minéraux primaires libère du fer soluble qui peut être utilisé par les organismes,

se lier à différents ligands organiques ou même être transformé en minéraux secondaires tels que les sulfures, les carbonates et les minéraux argileux. Les oxydes et les hydroxydes de diverses compositions et degrés de cristallisation contrôlent principalement la solubilité de cet élément dans le sol [Murad et Fischer, 1988 : Lindsay 1979]. La goethite est l'oxyde de fer le plus fréquent dans le sol car il est le plus stable dans les conditions environnementales rencontrées dans les sols. La goethite se trouve dans de nombreux types de sols et de régions climatiques et est responsable de la couleur ocre de nombreux sols. La goethite est souvent associée à l'hématite, deuxième forme la plus courante, mais la première ne semble pas être limitée à une région climatique spécifique, tandis que l'hématite se trouve dans les régions tropicales où les conditions de température et le pH favorisent sa formation. Seule une petite partie du fer oxydé est incorporée dans les silicates laminaires secondaires

[argiles] et/ou est complexée par la matière organique [Schwertman et Taylor, 1989]. Dans des conditions d'anaérobiose, les microorganismes peuvent utiliser les oxydes de Fe<sup>3+</sup> comme accepteurs finaux d'électrons pour réaliser l'oxydation de la matière organique. Comme accepteurs finaux d'électrons pour réaliser la décomposition oxydative de la matière organique. Ce processus entraîne la réduction du Fe<sup>3+</sup> en Fe<sup>2+</sup>, qui est généralement plus soluble.

#### LÉGENDE

- 1 Météorisation
- 2 Absorption
- 3 Décomposition après mort
- 4 Complexage
- 5 Hydrolyse
- 6 Réduction
- 7 Oxydation
- 8 Réduction par des organismes

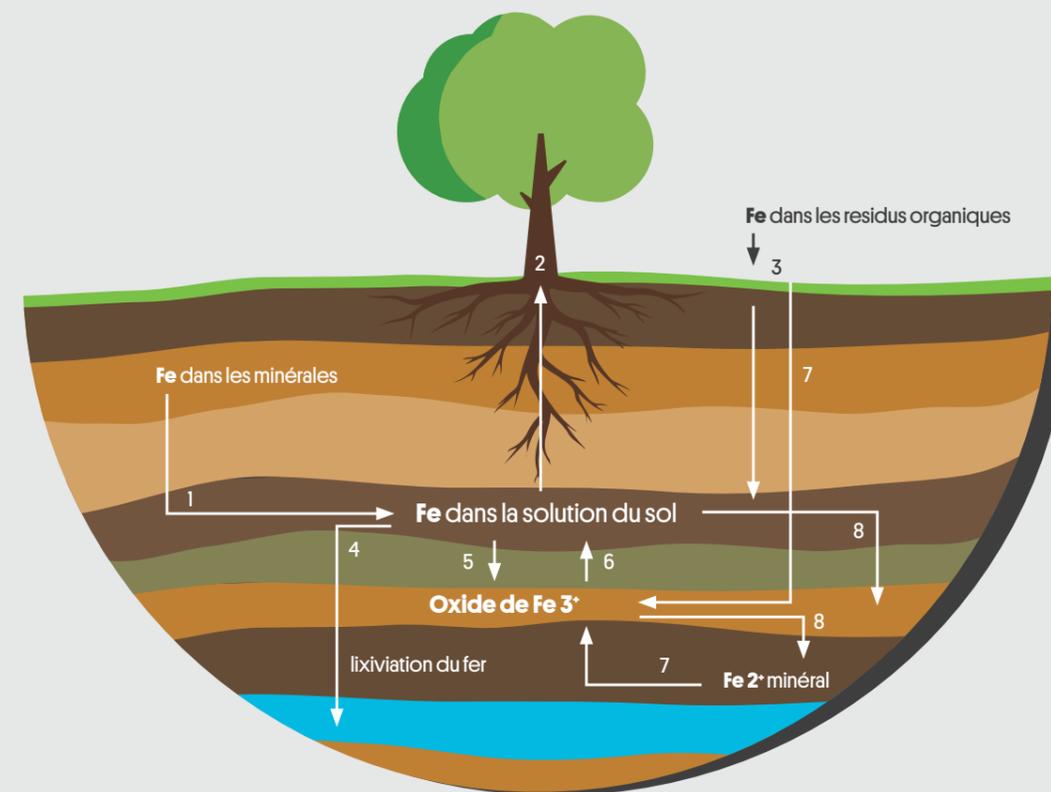


Fig. 1 Le cycle du fer dans le sol (adapté de Murad et Fischer, 1988).

### 1.3 La chimie du fer

Les composés du fer peuvent exister sous forme ferreuse [fer (II)] ou ferrique [fer (III)].

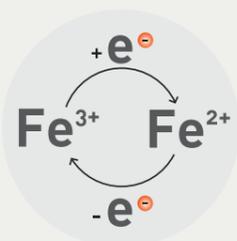


Fig. 2 Réaction d'oxydoréduction du fer.

Le fer est un élément de transition caractérisé par la facilité relative avec laquelle il peut changer d'état d'oxydation et par sa capacité à former des composés octaédriques avec divers ligands, avec une grande variation du potentiel redox en fonction du ligand. Cette variabilité lui confère une importance particulière dans les systèmes redox biologiques et dans le sol [Schwertman et Taylor, 1989 ; Schwertman 1991].

### 1.4 Des aspects sur la carence de fer

Le fer [Fe] est un micronutriment essentiel pour les plantes, les humains et les autres animaux. Au début du XVIIIe siècle, cet élément a été exploité comme médicament par certaines communautés, notamment les Égyptiens, les Hindous, les Grecs et les Romains [Guggenheim, K.Y.]. L'Organisation mondiale de la santé [OMS] affirme que l'absence de micronutriments en

quantité suffisante, comme le Fe et le Zn, représente une menace majeure pour la santé et le développement de la population mondiale.

Les carences en vitamines et en minéraux restent un grave problème de santé dans le monde, affectant plus de deux milliards de personnes, soit un individu sur trois (FAO ; FIDA ; PAM.) et principalement dans les pays en développement, la recherche de solutions permettant de réduire les effets néfastes de ces troubles nutritionnels est d'une importance capitale [Black, R.E. ; Allen]. Cette approche vise à placer le trait dense en micronutriments, comme le fer, dans les cultures de base et les produits alimentaires, en utilisant différentes procédures telles que les pratiques agronomiques pour obtenir un produit alimentaire final avec une teneur plus élevée en fer, en le considérant comme une stratégie importante pour réduire la carence en Fe chez les personnes [Cakmak 2002].

### 1.5 Les facteurs principaux qui affectent la disponibilité du fer

La carence en fer est généralement observée dans les cultures sur sols calcaires ou alcalins, dans les régions arides et semi-arides du monde ; ces sols couvrent plus de 30% de la surface terrestre [Figure 1] [Alvarez-Fernandez,

et al., 2006]. Les causes de la carence en fer ne sont pas seulement liées à l'indisponibilité du fer, mais elles peuvent dépendre de nombreuses situations et avoir une nature distincte. Les facteurs suivants sont les plus pertinents qui affectent la disponibilité du fer.

#### 1.5.1 La solubilité du fer dans le sol

Les études réalisées par Lindsay [1979, 1991] concernant les différentes solubilités des différents oxydes et hydroxydes de fer dans le sol [Fig. 3] mettent en évidence le fait que :

1. L'oxyde de fer amorphe serait le plus soluble tandis que la goethite serait le moins soluble.
2. La solubilité des oxydes et des hydroxydes de Fe<sup>3+</sup> présents dans l'environnement est étroitement liée au pH du sol ; ainsi, la solubilité diminue 1000 fois pour chaque augmentation d'unité de pH, réduisant la concentration de fer soluble à des valeurs inférieures à 10 E-10 M dans les environnements dont le pH est de 7,5.

3. La région où la solubilité du fer est la plus faible correspond à un intervalle de pH compris entre 7,5 et 8,5 [Fig. 4], qui coïncide avec les sols calcaires. La concentration de fer pour cet intervalle

de pH est approximativement inférieure à 10 E-10 M, une quantité insuffisante pour une croissance optimale des plantes, qui nécessitent une gamme de fer soluble de 10 E-4 et 10 E-9 dans l'environnement [Guerinot et Yi, 1994]. Des études réalisées par Römheld et Marschner [1986] ont montré que dans les sols bien aérés, la quantité de fer dissous à des valeurs de pH supérieures à 4 est inférieure à la quantité requise pour la plupart des végétaux, ce qui entraîne des carences en fer chez les plantes cultivées dans ces sols.

Comme le fer peut être présent dans deux conditions, le potentiel redox du sol est un autre facteur qui influence la teneur de ce nutriment. Dans les sols bien aérés - une condition normalement remplie par les terres cultivées - le Fe<sup>3+</sup> n'est pas altéré par le potentiel redox. Le Fe<sup>2+</sup> peut être présent sous différentes formes selon le pH du sol : à un pH inférieur à 6,7, l'espèce prédominante est le Fe<sup>2+</sup>, tandis qu'à des valeurs de pH plus élevées, les principales espèces sont les FeOH<sup>+</sup> [Fig. 5].

Dans des conditions aérobies, ces espèces sont instables ; cependant, en présence de conditions réductrices, ces deux espèces sont les plus abondantes et ce sont elles qui contrôlent la quantité de fer disponible pour les plantes [Lindsay, 1991]. Dans les sols qui ont été récemment réduits, la solubilité du fer sera apparemment contrôlée par la sidérite [FeCO<sub>3</sub>]. L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans le sol entraînera une diminution de la solubilité du fer pour les plantes [Lindsay et Schwab, 1982].

Par conséquent, la règle générale pour la solubilité du fer est que dans des conditions aérobies et avec un pH neutre ou alcalin, le fer précipitera sous des formes insolubles, tandis qu'avec un pH acide et des conditions réductrices, la concentration de fer soluble sera plus élevée.

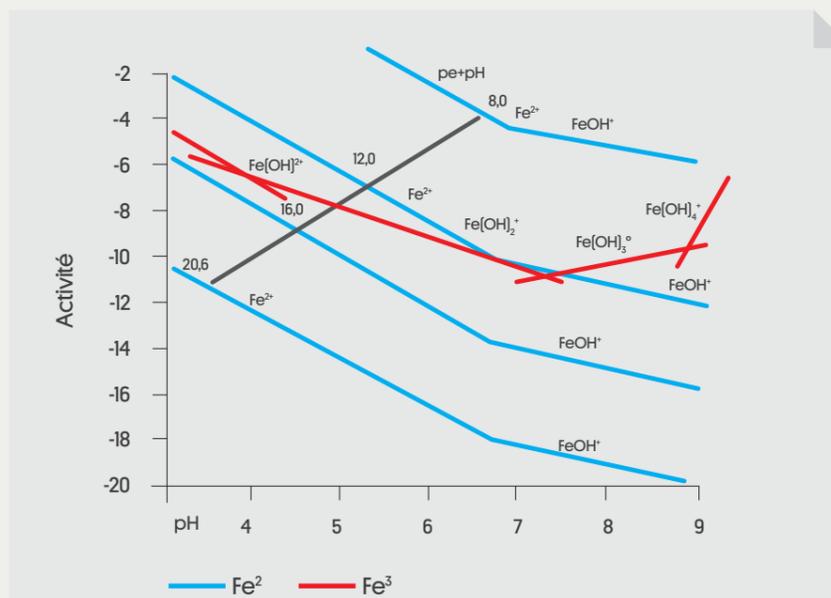


Fig. 5 Effet par rapport au potentiel redox pour les formes Fe<sup>2+</sup> et Fe(OH)<sup>+</sup> par rapport aux formes hydrolysées de Fe<sup>3+</sup> en équilibre avec le système Fe-sol [Lindsay et Schwab, 1982].

### 1.5.2 Présence de bicarbonates (pH)

L'ion hydrogénocarbonate dans le sol calcaire, déplace le pH dans la gamme de 7-5-8,5, et dans des conditions extrêmes jusqu'à 9. À ce pH, la concentration de fer soluble est faible [Lindsay, 1979, 1991 ; Lindsay et Schwab, 1982] ; il est donc difficile pour les cultures d'obtenir la nutrition ferrique dont elles ont besoin. De plus, les principaux mécanismes de réponse de la plante sont négativement impactés par la carence en fer : les protons libérés par la végétation sont neutralisés,

l'alcalinisation réduit la sécrétion des composés phénoliques et rend difficile la réduction du Fe<sup>3+</sup> dans la membrane plasmique [Römheld et Marschner, 1986]. Tout cela influence la biodisponibilité du fer, provoquant de grandes altérations et inhibant la réponse de la culture à la carence en fer. [Susin et al. 1996]. Le tableau 1 rapporte les caractéristiques de quelques sols alcalins.

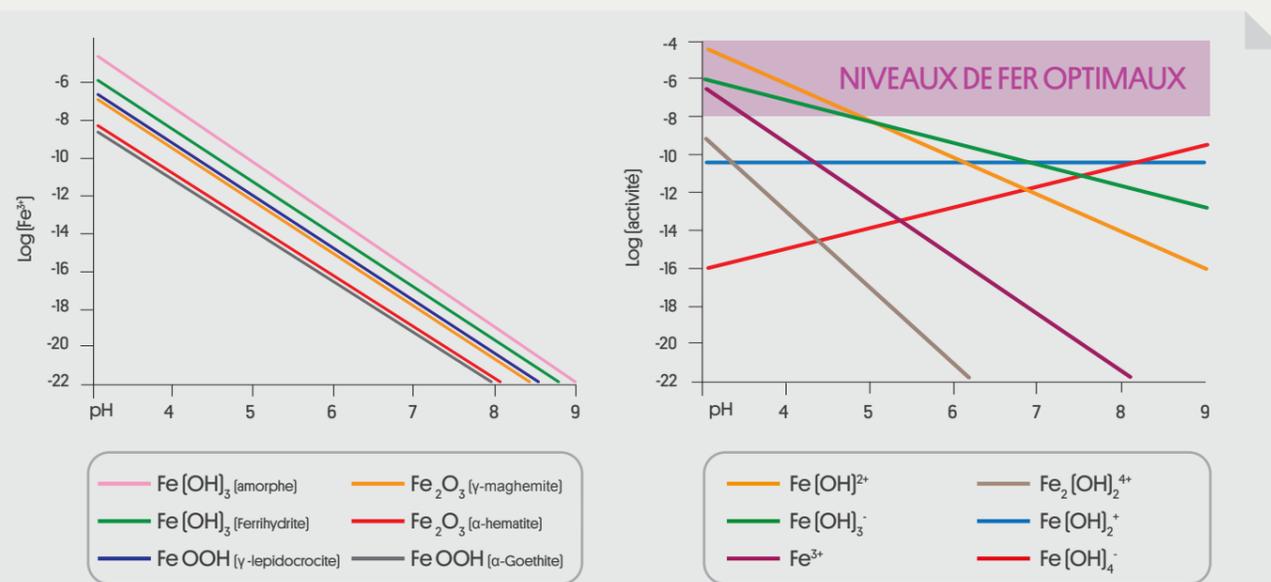


Fig. 3 L'activité du Fe<sup>3+</sup> dans les différents oxydes et hydroxydes ferriques présents dans les sols en fonction du pH [Lindsay, 1979].

Fig. 4 Espèces hydrolysées de Fe<sup>3+</sup> en équilibre avec le Fe du sol [Lindsay, 1979].

SOL	STRATE, CARACTERISTIQUES	FERTILITÉ	pH	DISTRIBUTION
Alfisols	Différencié, notamment le strate argileux	Déficient, a besoin d'engrais	7,5 / 7,8	Les régions humides et tempérées d'Amérique du Nord et de l'Europe
Aridisols	Différencié, notamment le strate argileux	Bonne avec risques	7,8 / 8,1	Dans les régions désertiques dans le monde entier
Mollisols	Différencié, avec un horizon de surface organique épais et sombre	Excellent, particulièrement pour les céréales	6,1 / 8,6	Grandes prairies, Pampa argentine, steppe russe
Vertisols	Aucune, haute teneur d'argile expansive	Bonne	7,6 / 9,5	Les pâturages dans les régions qui sont saisonnièrement sèches, par exemple en Inde, au Soudan et au Texas.

Tab. 1 Principales caractéristiques des sols [alfisols, aridisols, mollisols, vertisols].



### 1.5.3 Interaction entre le fer et des autres éléments

Les nutriments essentiels aux plantes peuvent interagir avec le fer et déclencher sa carence dans les cultures ; voici quelques-unes des interactions les plus pertinentes :

#### INTERACTION IONIQUE ENTRE Fe/Mn

Les micro-éléments fer et manganèse sont interdépendants : l'effet de la présence de l'un dans les tissus végétaux coïncide proportionnellement à la quantité de l'autre. La réactivité du fer dépend de son état d'oxydation, mais le manganèse a un meilleur potentiel d'oxydation que le fer ; s'il y a un équilibre entre les deux, le Mn oxyde le fer en excès et le transforme en fer inactif, qui est immobilisé par les phosphates, formant un précipité de fer-phosphate [phosphoprotéine appelée phytoferritine]. S'il y a un déséquilibre entre les deux, deux états différents peuvent se produire :

1. L'excès de fer dans la solution provoque la perte de l'équilibre dynamique entre les deux éléments, ce qui entraîne des symptômes secondaires d'excès de fer avec des symptômes similaires à une carence en manganèse.

2. En cas d'excès de manganèse, les plantes deviennent chlorotiques dans leurs nouvelles feuilles avec des symptômes similaires à ceux de la

carence en fer. L'excès de manganèse provoque une oxydation excessive de Fe<sup>2+</sup> en Fe<sup>3+</sup>, ce dernier étant insoluble et donc inutilisable pour les cellules.

Des niveaux élevés de Mn soluble dans le tissu sont liés à de faibles niveaux de Fe soluble et vice versa, [Somers et J. W. Shive 1942].

Dans les situations de culture en extérieur, la chlorose ferrique se produit en même temps, masquant la chlorose déclenchée par la carence en manganèse. La correction de cette dernière provoque dans de nombreux cas la manifestation visuelle de la seconde et l'exacerbe. Ceci a été confirmé à de nombreuses reprises par les chercheurs [Warden et al. 1991]. Cela

signifie que le rapport Fe/Mn dans les solutions nutritives est plus important que les concentrations de Fe et de Mn [Somers et Shive 1942, et Warden 1991].

Fig.6 Répartition mondiale des sols [alfisols, aridisols, mollisols, vertisols] : source USDA-NRCS adaptée par VALAGRO 2011.

■ Distribution mondiale des sols alfisols, aridisols, mollisols et vertisols.

#### INTERACTION IONIQUE ENTRE Fe/K

Le rôle du K<sup>+</sup> est très important pour le fonctionnement de la pompe à protons ; ainsi, les plantes ne sont pas capables de répondre au stress ferrique en l'absence de K<sup>+</sup>, même si cet ion est remplacé par du Na [Jolley et al 1988], ce qui signifie qu'une teneur suffisante en potassium est liée à une meilleure réponse à la carence en fer, tant chez les plantes de la Stratégie I que chez celles de la Stratégie II. [Hughes et al, 1992]. Par conséquent, la présence de potassium est importante pour la disponibilité du fer, ce qui est considéré comme utile en termes agronomiques.

#### PHYTOSIDÉROPHORES

De nombreux auteurs ont démontré que les phytosidérophores (PS) libérés par les espèces de graminées peuvent mobiliser le Fe à partir de sources peu solubles du sol. [Römheld et Marschner 1990]. La quantité de phytosidérophores présents dans l'environnement est liée au degré de chlorose [Kawai et al, 1988].

#### TEMPÉRATURE

Les températures extrêmes sont un autre facteur qui induit la chlorose ferrique ; les basses températures provoquent une réduction du développement des racines et donc une réduction de la capacité d'absorption du fer [Chaney, 1984].

En même temps, les températures élevées réduisent la stabilité des phytosidérophores, réduisant ainsi la disponibilité du fer [Awad et al. 1988].





# 2

## Le fer dans les plantes

Giustino Strolli, Gianluca Nicolini - Global Research

### 2.1 L'absorption

Face à une carence en fer, les plantes peuvent rester indifférentes, développer une réponse légère [plantes inefficaces], ou développer des mécanismes d'adaptation qui leur permettent d'augmenter leur capacité d'absorption du fer de la solution du sol (Fig. 7) [plantes efficaces] (Mengel and Kirby, 2001). Dans chaque groupe, le degré de réponse est différent, même entre espèces et génotypes (Brown et Jolley, 1988; Shi et al., 1993).

En ce qui concerne les états d'oxydation dans lesquels le fer se présente dans le sol - Fe<sup>3+</sup> ferrique et Fe<sup>2+</sup> ferreux - il est admis que la plante préfère le Fe<sup>2+</sup>, bien qu'il existe des plantes capables d'absorber le fer sous forme de Fe<sup>3+</sup> chélaté. Le Fe<sup>2+</sup> est de préférence absorbé par les racines par un processus d'absorption active (Uren, 1984), dans des sols bien aérés, ce qui est normalement le type de sol dans lequel on trouve les terres cultivées. Dans ces conditions, il est nécessaire de passer par une étape préalable de

réduction du Fe<sup>3+</sup> en Fe<sup>2+</sup>. Ce processus est réalisé par une enzyme réductase située dans la membrane plasmique de la racine (Römheld, 1987). Le Fe<sup>2+</sup> est également absorbé par l'épiderme foliaire et la surface des branches.

### 2.2 Stratégies d'absorption

Dans les situations où il y a une carence en fer dans l'environnement, les plantes supérieures ont développé une série de mécanismes pour augmenter la disponibilité du fer dans la solution du sol. Ces plantes sont divisées en deux groupes selon le modèle de réponse qu'elles développent face à cette carence : les plantes de stratégie I et de stratégie II (Marschner et al 1986 ; Brown et Jolley, 1988 ; Hopkins et al 1992).

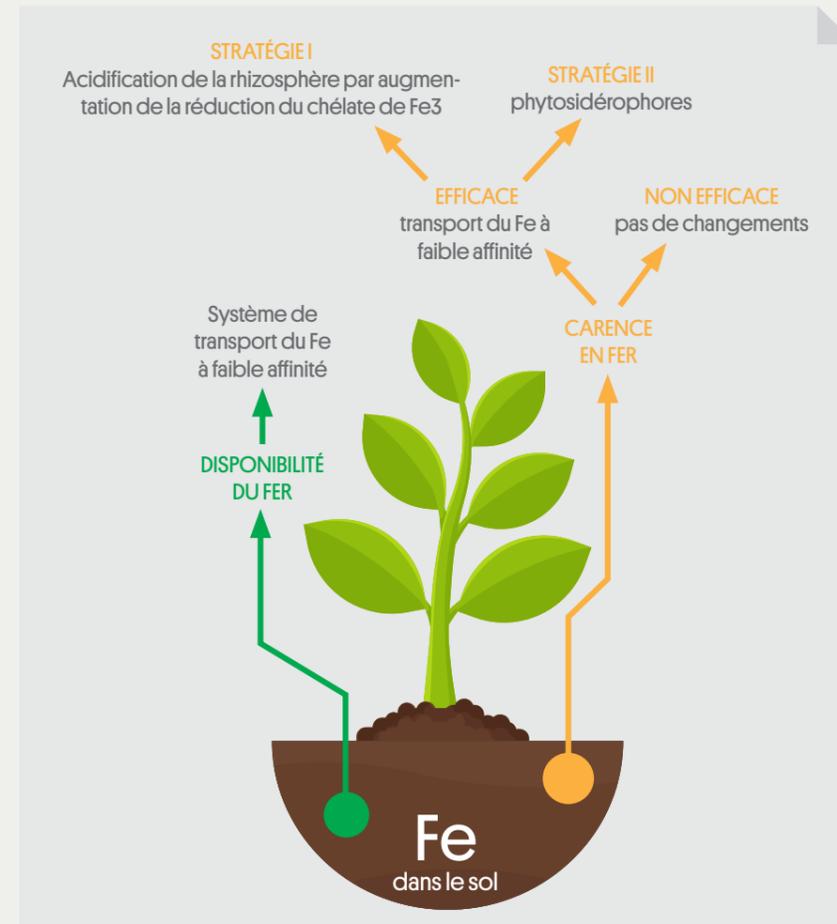


Fig. 7 Réactions de la plante en cas de carence en fer.

**LÉGENDE**  
 → UNIDIRECTIONNEL  
 ↔ MUTUEL

### ✘ ANTAGONISME

POTASSIUM [K]	→	BORE [B]
MAGNESIUM [Mg]	↔	POTASSIUM [K]
MOLYBDÈNE [Mo]	→	CUIVRE [Cu]
CUIVRE [Cu]	→	MANGANÈSE [Mn] FER [Fe]
PHOSPHORE [P]	→	ZINC [Zn] POTASSIUM [K] CUIVRE [Cu] CALCIUM [Ca] FER [Fe]
ZINC [Zn]	→	FER [Fe]
BORE [B]	→	POTASSIUM [K]
FER [Fe]	→	PHOSPHORE [P]
NITROGÈNE [N]	→	POTASSIUM [K] CUIVRE [Cu] BORE [B]
CALCIUM [Ca]	↔	POTASSIUM [K] MAGNESIUM [Mg] NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
CALCIUM [Ca]	→	MANGANÈSE [Mn] ZINC [Zn] BORE [B] PHOSPHORE [P] FER [Fe]

### ✔ SYNERGISME

NITROGÈNE [N]	→	MAGNESIUM [Mg]
MAGNESIUM [Mg]	→	PHOSPHORE [P]
MOLYBDÈNE [Mo]	→	NITROGÈNE [N]
POTASSIUM [K]	→	MANGANÈSE [Mn] FER [Fe]
SULPHATE [SO <sub>2</sub> ]	→	NITROGÈNE [N] POTASSIUM [K] CUIVRE [Cu] MANGANÈSE [Mn] MAGNESIUM [Mg]
FER [Fe]	→	MANGANÈSE [Mn]

Tab.2 Interaction ionique des nutriments dans le sol.

## 2.2.1 STRATÉGIE I

Les plantes dicotylédones et monocotylédones, à l'exception des graminées, développent ce type de réaction. Dans des circonstances où il y a une carence en fer, ces plantes améliorent leur absorption par trois réactions :

1. une augmentation de l'activité d'une réductase liée à la membrane plasmique dans les cellules du rhizoderme, responsable de la réduction du  $Fe^{3+}$ , qui provoque une augmentation de la vitesse de décomposition de la réduction du  $Fe^{3+}$ , qui à son tour provoque une augmentation de la vitesse de décomposition du  $Fe^{3+}$  chélaté et par conséquent absorbe le fer réduit pour la plante.

Cette dissociation des chélates est le principal mécanisme de la stratégie I. Ainsi, les cellules racinaires des plantes de la stratégie I possèdent deux systèmes de réduction du  $Fe^{3+}$  : la réductase standard et la turbo réductase, dont la capacité de réduction est 20 fois supérieure à celle du système standard [Moog et Brüggeman, 1994].

2. Consiste en l'expulsion de  $H^+$  par les racines vers la rhizosphère.

Cette sous-stratégie est moins fréquente ; seules quelques dicotylédones la démontrent [Marschner et al., 1986 ; Zocchi et Cocucci, 1990 ; Toulon et al., 1992]. Cet effet est dû à l'induction d'une pompe à protons, qui dépend de l'ATP de la membrane plasmique [Zocchi et Cocucci, 1990 ; Toulon et al., 1992]. Une diminution du pH de la rhizosphère a lieu lorsque la capacité d'excrétion des protons est augmentée, ce qui permet d'augmenter la solubilité du fer présent dans le sol et l'activité de la turbo réductase car cette enzyme atteint son activité maximale à pH 6,5 [Holden et al., 1991 ; Jolley et al., 1988], soulignant le rôle du  $K^+$  dans le fonctionnement de la pompe à protons.

3. Cette troisième sous-stratégie se retrouve chez certaines espèces ; les plantes qui démontrent la

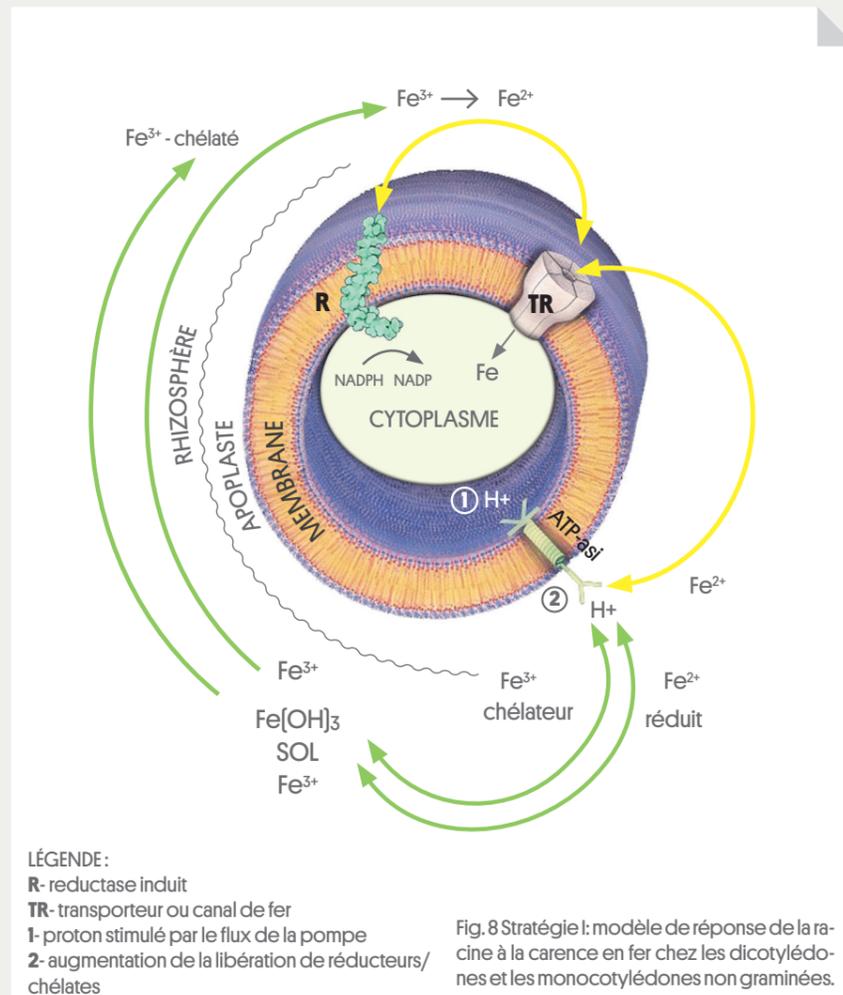


Fig. 8 Stratégie I: modèle de réponse de la racine à la carence en fer chez les dicotylédones et les monocotylédones non graminées.

stratégie I sont caractérisées par l'induction d'un système de transport du fer dans la membrane plasmique [Young et Terry, 1982; Fox et al., 1996; Fox et Guerinot, 1998]. Des études réalisées sur des plants de concombre ont montré qu'il existe deux systèmes de transport du fer différents (un à haute affinité et un à faible affinité). Dans les situations où il y a suffisamment de fer, le système à faible affinité transporte le fer vers la plante, tandis que le système à haute affinité est activé en cas de carence en fer [Zaharieva et Römhelt, 2000].

## CHANGEMENTS MORPHOLOGIQUE DANS LES RACINES

En plus de ces trois réactions, les plantes qui développent cette stratégie peuvent générer un autre type de réponse pour augmenter la capacité du sol à absorber le fer [Abadía 1998 ; López-Millán, 2000]. Elles ont tendance à augmenter la surface de contact entre les racines et le sol. Ces changements consistent en la formation de poils racinaires, l'épaississement des régions subapicales et le développement de cellules de transfert dans l'épaississement [Jones, 1998].

racines et le sol. Ces changements consistent en la formation de poils racinaires, l'épaississement des régions subapicales et le développement de cellules de transfert dans l'épaississement [Welkie et Miller, 1993].

## EXCRÉTION DE COMPOSÉS DE FAIBLE POIDS MOLÉCULAIRE

En plus de ces trois réactions, les plantes qui développent cette stratégie peuvent générer un autre type de réponse pour augmenter la capacité du sol à absorber le fer [Abadía 1998 ; López-Millán, 2000]. Elles ont tendance à augmenter la surface de contact entre les racines et le sol. Ces changements consistent en la formation de poils racinaires, l'épaississement des régions subapicales et le développement de cellules de transfert dans l'épaississement [Jones, 1998].

## CHANGEMENTS DE PROTÉINES DANS LES RACINES

Divers travaux ont été réalisés en utilisant l'électrodéposition et la transcription in vitro de l'ARNm des racines [Bienfait, 1988b; Herbig et al, 1996].

## 2.2.2 STRATÉGIE II

Seules les plantes graminées développent ce type de réponse ; la réponse des plantes de stratégie II aux situations de carence en fer est caractérisée par la libération dans la zone racinaire d'acides aminés protéinogènes de faible poids moléculaire, appelés phytosidérophores, qui chélatent le  $Fe^{3+}$  présent dans le sol et sont ensuite absorbés sans réduction préalable via un système de transport des phytosidérophores  $Fe^{3+}$  à haute affinité [Römhelt et Marschner, 1986 ; Takagi, 1976]. La libération des phytosidérophores suit un rythme diurne caractéristique [Fig 9] et est rapidement réduite avec l'apport en fer [Marschner, 1995]. Le rythme diurne de libération des phytosidérophores dans les plantes présentant des carences en fer est inversement lié au volume d'un type particulier de vésicule dans le cytoplasme des cellules corticales [Nishizawa and Mori, 1987]. Les phytosidérophores (PS) sont le nom donné à l'acide muginéique et à ses dérivés. Ils sont libérés par les racines et forment des complexes très stables avec le  $Fe^{3+}$ , augmentant ainsi la quantité de fer en dissolution. Le nombre de PS libérés est lié au degré de résistance à la chlorose [Kawai et al., 1988 ; Hansen et al., 1996]. La biosynthèse de la PS dans la racine augmente si la carence augmente, avec une augmentation jusqu'à 20 fois par rapport aux plantes témoins [Takagi et al., 1984]. Le transport du complexe vers le cytoplasme cellulaire se fait par l'intermédiaire d'une protéine spécifique qui a été récemment identifiée [Curie et al., 2001] et localisée dans la zone apicale de la racine et de la tige et

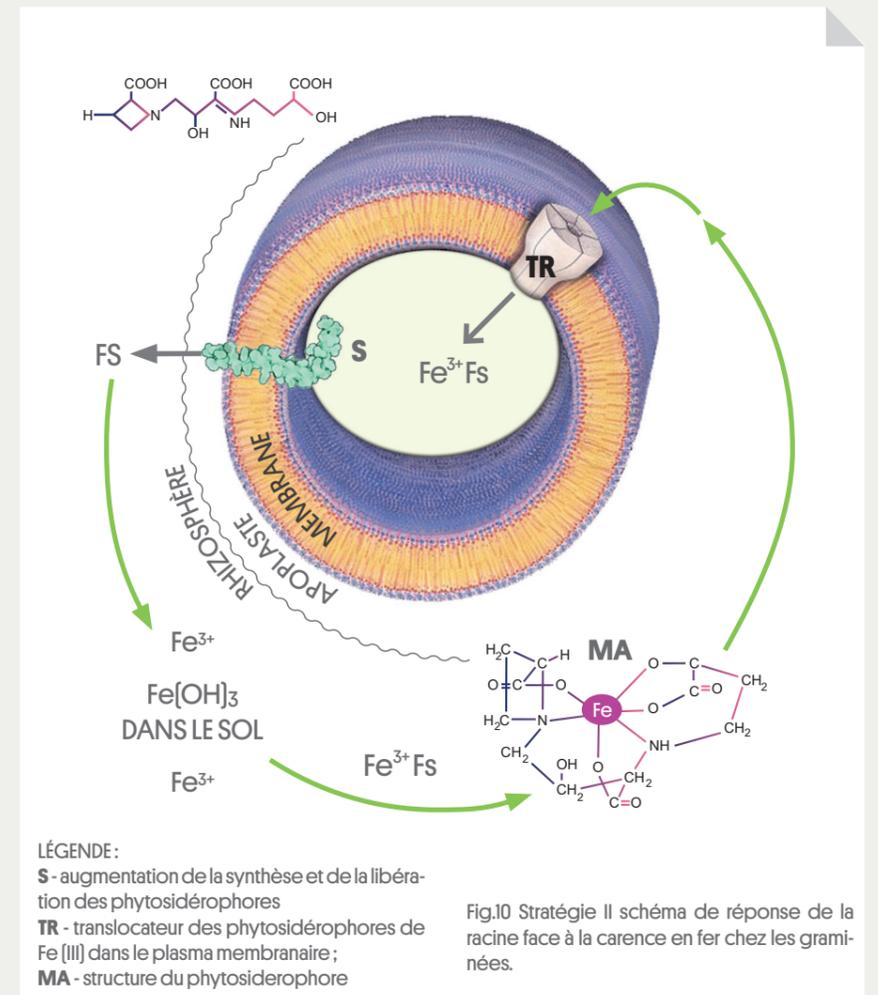


Fig.10 Stratégie II schéma de réponse de la racine face à la carence en fer chez les graminées.

permet le transport du complexe  $Fe^{2+}$ -NA [NA= nicotianamine] et éventuellement d'autres métaux [Hell et Stephan, 2003]. Une fois le complexe dans le cytosol, le  $Fe^{3+}$  est libéré et le PS se dégrade ou est excrété vers l'extérieur.

Il a été prouvé que les PS libérés et le complexe de fer sont absorbés par les racines de la plante [Kawai et Alam, 2005]. Les deux démontrent une absorption différente, ce qui suggère que les cellules de la racine pourraient faire la différence entre le PS libéré et le complexe, de sorte que le PS libéré pourrait ensuite être excrété dans la rhizosphère. Méthionine ' nicotianamine ' acide 2-déoxymuginique ' acide muginique ' acide 3-hydromuginique. Le cycle de synthèse de la méthionine [Fig.11]

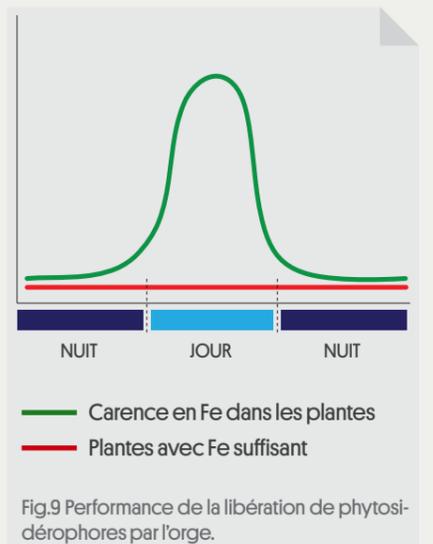


Fig.9 Performance de la libération de phytosidérophores par l'orge.

connaît une activation substantielle dans les racines des plantes carencées en fer causée par la méthionine pour la synthèse des phytosidérophores ; ce fait a été établi dans les racines mais pas dans la partie de la plante qui est au-dessus du sol [Kobayashi et al., 2006].

### 2.3 Le transport du fer dans les plantes

L'ion ferreux est transporté dans le cortex racinaire via le symplaste au moyen des plasmodesmes lorsqu'il apparaît sous la forme de Fe<sup>2+</sup> - nicotianamine [Pich et al., 1997 ; Stephan, 2002]. Par la suite et toujours dans le symplaste du système racinaire, le Fe<sup>2+</sup> subit une oxydation pour devenir Fe<sup>3+</sup>. Une fois sous la forme Fe<sup>3+</sup>, il est transporté vers les parties supérieures de la plante via le xylème sous la forme d'un complexe soluble de dicitrate [Tiffin, 1970 ; Cambell et Redinbaugh, 1984 ; López- Millán et al., 2000<sup>a</sup> ; Mengel et Kirby, 2001 ; Stephan, 2002]. Une fois que le fer atteint les feuilles, il doit retraverser la membrane plasmique des cellules foliaires. Cette étape nécessite à nouveau la réduction du Fe<sup>3+</sup> en Fe<sup>2+</sup>, un processus qui est réalisé par une enzyme réductase comme celle de la racine [Brüggemann et al., 1993 ; de la Guardia et Alcántara, 1996 ; González-Vallejo et al. ; 1998, 2000 ; Rombolà et al., 2000]. Bien que le transport se fasse par le xylème, le fer a été trouvé dans le phloème. La capacité à transporter cet ion est liée à la réponse des plantes aux carences en fer. Le transport de Fe<sup>3+</sup> dans le phloème se fait sous forme de Fe<sup>3+</sup> - nicotianamine [Becker et al., 1992 ; Stephan et Scholz, 1993]. Il faut considérer que des concentrations élevées de Fe<sup>2+</sup> dans le cytoplasme cellulaire ont des effets toxiques [Mengel and Kirby, 2001]. Par conséquent, le fer doit être rapidement oxydé en Fe<sup>3+</sup>. Ainsi, l'ion ferreux est transporté vers le chloroplaste, où il est oxydé en Fe [OOH] et accumulé sous la forme d'une phosphoprotéine connue sous le nom de phytoferritine, une protéine multi-numérique qui sépare plus de 4- 103 atomes de fer sous la forme d'un minéral stable à l'intérieur de l'enrobage protéique [Theil, 1987 ; Andrews et al., 1992 ; Laulhere et Briat, 1993], créant ainsi une réserve

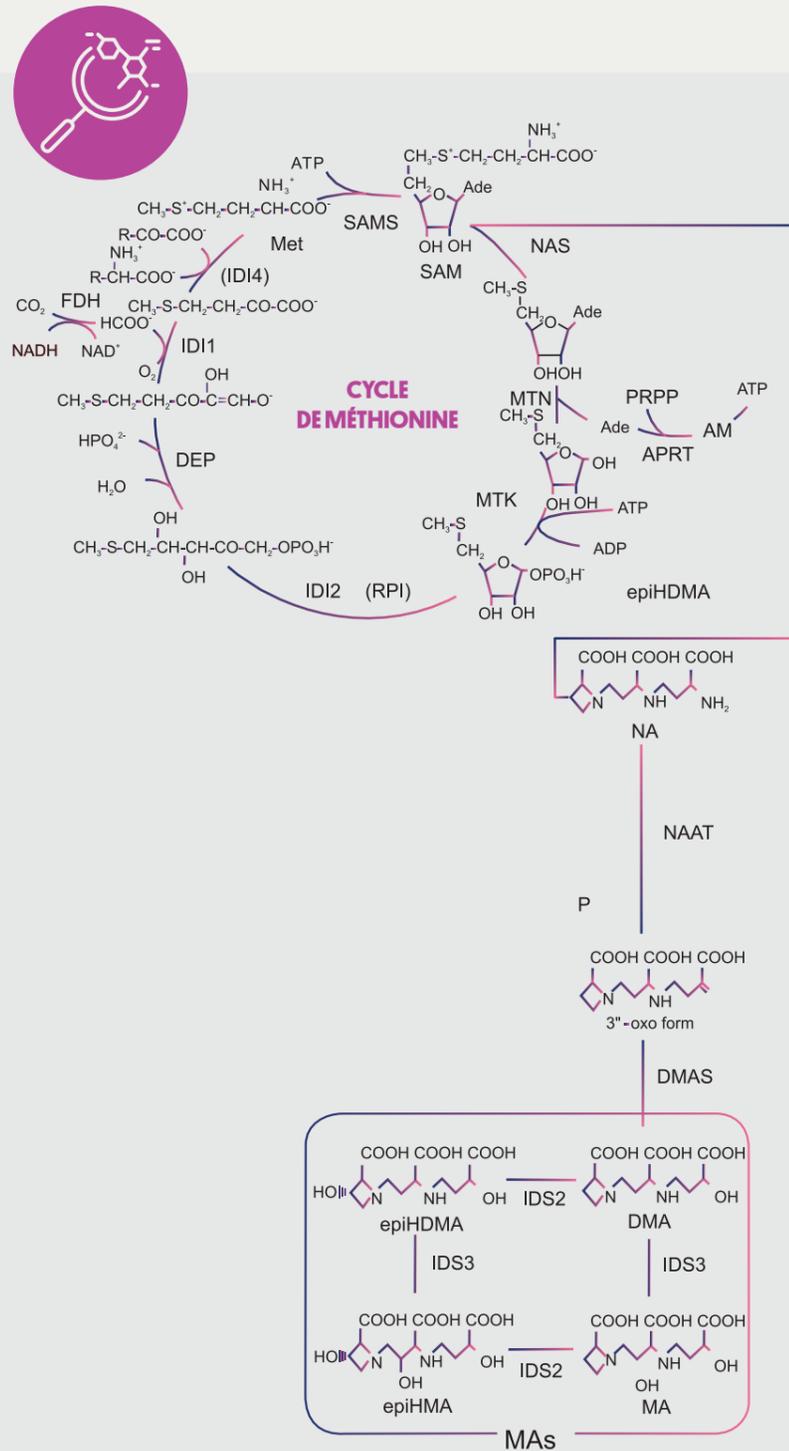


Fig.11 Synthèse des phytosidérophores et cycle de la méthionine chez les Graminées [Kobayashi et al., 2005].

de fer non toxique dans la cellule. La phytoferritine se trouve principalement dans les chloroplastes, mais elle n'est pas confinée uniquement à cet organite, car elle a également été trouvée dans le xylème et le phloème [Smith, 1984].

En cas de carence en fer, l'ion ferrique est à nouveau réduit en ion ferreux, qui pourrait être transporté sous forme de Fe-nicotianamine à travers les cellules [Mengel et Bübl, 1983 ; Laulhere et Briat, 1993]. Le transport du fer dans les plantes de stratégie II - à travers les racines et le xylème - est réalisé sous la forme de Fe-phytosidérophore [Mori et al., 1991 ; Alam et al., 2001 ; Kawai et al., 2001].

### 2.4 Fonctions biologique du fer dans les plantes

La carence en Fe est un problème mondial dans la production végétale, affectant le rendement à la fois qualitativement et quantitativement [Mortvedt, 1991] ; les plantes n'atteignent pas leur plein potentiel de croissance, et la valeur nutritionnelle est compromise, ce qui entraîne des pertes économiques et des limitations dans la sélection des cultures [Chaney, 1984]. Dans les cas extrêmes, la carence en Fe peut entraîner une perte totale de la récolte [Chen et Barak, 1982]. La liste des espèces végétales affectées est vaste et comprend le pommier, les agrumes, la vigne, l'arachide, le riz sec, le sorgho et le soja [Marschner, 1995].

En tant que composant critique des protéines et des enzymes, le fer joue un rôle important dans les processus biologiques de base tels que la

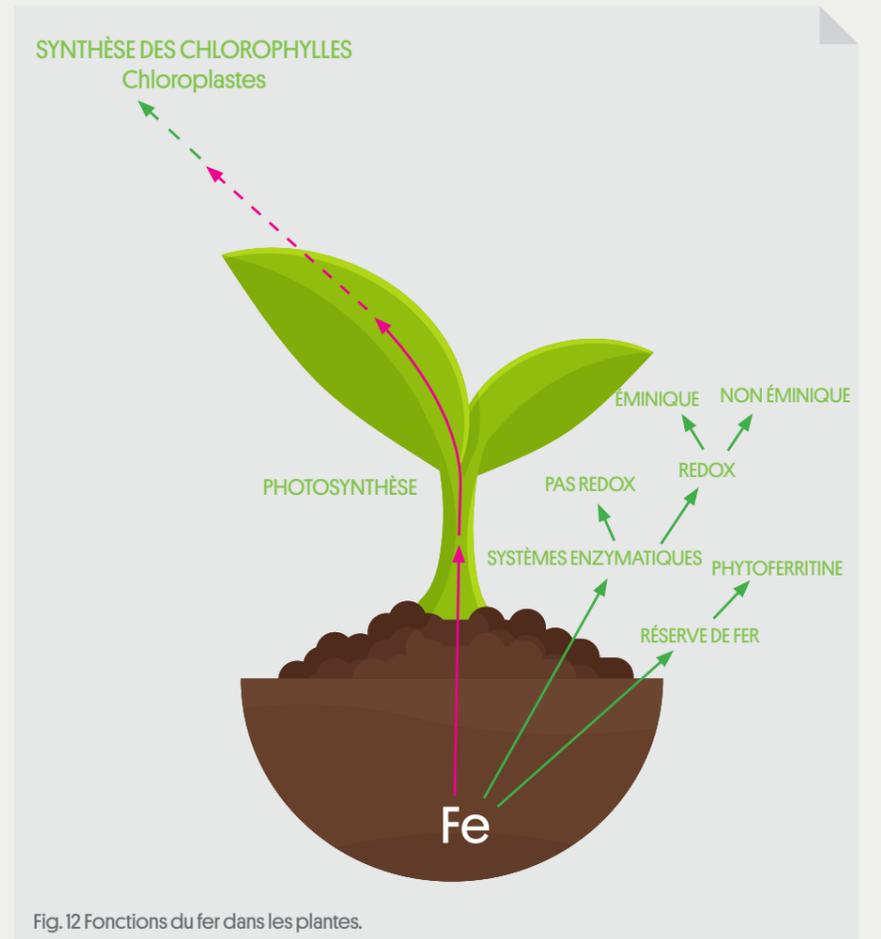


Fig.12 Fonctions du fer dans les plantes.

photosynthèse, la synthèse de la chlorophylle, la respiration, la fixation de l'azote, les mécanismes d'absorption [Kim et Rees, 1992], il est essentiel pour le maintien de la structure du chloroplaste et la fonction de synthèse de l'ADN par l'action de la ribonucléotide réductase [Reichard, 1993]. Le fer est également un cofacteur actif de nombreuses enzymes nécessaires à la synthèse des hormones végétales, comme l'éthylène, la lipoxygénase, l'acide 1-aminocyclopropane-1- carboxylique oxydase [Siedow, 1991], ou l'acide abscissique [composés actifs dans de nombreuses voies de développement [Rout et Sahoo, 2015].

Le plus connu des composants des systèmes non hémiques est la ferrédoxine, une protéine ferrique qui agit comme accepteur final d'électrons dans de nombreux processus

métaboliques tels que la photosynthèse, la réduction des nitrates et des sulfates [Mengel et Kirby, 2001 ; Marschner, 1995]. Son potentiel redox élevé lui permet de réduire des substances telles que le NADP<sup>+</sup>, le nitrate, l'oxygène et le sulfate. L'aconitase est une enzyme à fer non hémique qui catalyse l'isomérisation du citrate en isocitrate dans le cycle des acides tricarboxyliques [Hsu et Miller, 1968 ; Beinert et Kennedy, 1989 ; Marschner, 1995]. D'autres enzymes contenant du fer non hémique sont les riboflavines ; elles s'accumulent dans les plantes présentant des carences en fer 200 fois plus que dans les plantes qui poussent dans des environnements contenant suffisamment de cet élément [Welkie et Miller, 1989]. Cette accumulation de riboflavine se produit parce que la carence en fer provoque des altérations dans le métabolisme des purines puisque l'enzyme xanthine

oxydase est gravement endommagée [Schlee et al., 1968].

Les enzymes superoxyde dismutase constituent un autre système de fer non héminique qui élimine les radicaux libres anioniques superoxyde : il s'agit d'isoenzymes communes dans les chloroplastes, mais on peut également les trouver dans les mitochondries, les peroxysomes et le cytoplasme [Droillard et Paulin, 1990], ou la xanthine oxydase, qui a des fonctions dans des processus métaboliques tels que la photosynthèse, la respiration mitochondriale, la fixation de N<sub>2</sub>, la

réduction de SO<sub>4</sub><sup>2+</sup> en SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, etc. Il existe une série d'enzymes moins connues dans lesquelles le fer agit également comme composant métallique dans les réactions d'oxydoréduction ou comme élément de liaison entre l'enzyme et le substrat [Marschner, 1995]. Cela inclut les lipoxygénases qui régulent la peroxydation des lipides, ce qui signifie qu'elles sont impliquées dans la sénescence cellulaire et tissulaire et dans les combinaisons incompatibles hôte-pathogène et donc dans la résistance aux maladies [Nagarathana

et al., 1992]. Le fer joue un rôle important dans la photosynthèse, non seulement en raison de son implication dans la synthèse de la chlorophylle [Miller et al., 1984], mais aussi en raison de son influence sur la morphologie des chloroplastes [Terry et Abadía, 1986; Marschner 1995].

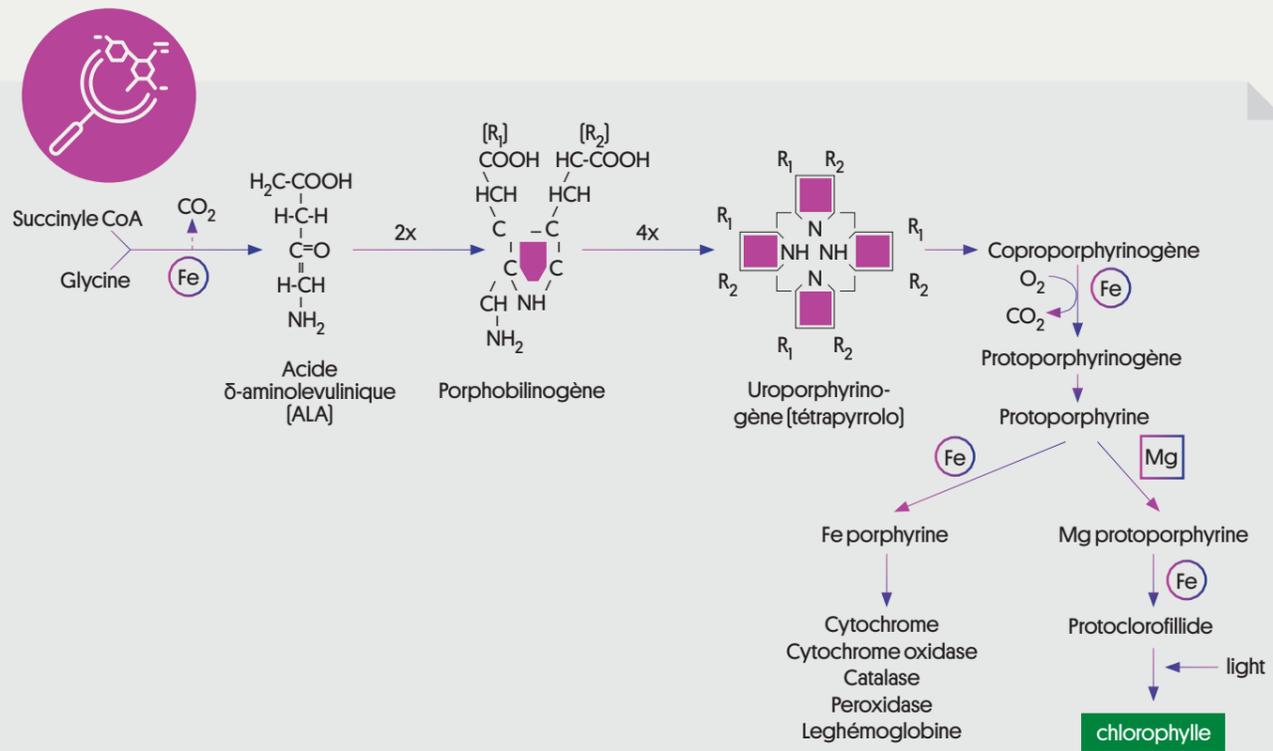


Fig.13 Le rôle du fer dans la synthèse de la chlorophylle [Marschner, 1995].



3

La chlorose  
ferrique

Giustino Siroli - Global Research

### 3.1 LA CHLOROSE FERRIQUE

La chlorose ferrique est considérée comme l'une des carences nutritionnelles les plus complexes [Pestana et al., 2003] et est causée par divers facteurs liés à la disponibilité du fer dans le sol, son absorption par les racines et sa distribution dans les tissus végétaux [Lucena, 2000<sup>a</sup>; Alvarez-Fernandez, 2000].

La chlorose ferrique se manifeste généralement par la perte de la couleur verte des feuilles due à une diminution de la concentration des pigments photosynthétiques, fondamentalement la chlorophylle [Abadia et Abadia, 1993]. Elle se produit généralement dans la zone internervaire des jeunes plantes, mais les nervures restent vertes car le fer est peu distribué dans les zones de croissance.

Un facteur important de la chlorose ferrique est qu'elle provoque une diminution ou une inactivation de tous les processus physiologiques dans lesquels le fer est impliqué, en particulier la synthèse de la chlorophylle, ce qui se traduit par une réduction de la production et de la qualité des cultures, y compris la mort prématurée de la plante.

Les méthodes utilisées jusqu'à présent pour résoudre ce problème sont l'application localisée de sels et de chélates de fer aux plantes [application dans le sol ou par voie foliaire], la modification artificielle du pH de la solution du sol [application d'acides organiques et inorganiques] et l'utilisation de cultivars de la variété cultivée ayant la capacité d'absorber le fer des sols dans lesquels l'élément n'est pas facilement disponible [Olsen et al., 1987; Chen et Barak, 1982; Emery, 1982].

### 3.2 SYMPTÔMES VISIBLES

La carence en fer est la symptomatologie la plus facile à reconnaître parmi celles causées par les autres micronutriments car elle produit un type de chlorose caractéristique. Les symptômes varient en fonction de :

- L'âge de la feuille ;
- La gravité de la carence ;
- Les conditions environnementales.

Dans le cas des plantes graminées, les symptômes sont plus difficiles à identifier car ils peuvent être confondus avec le magnésium car ils se présentent sous forme de bandes jaunes entre les nerfs alternant avec des nerfs verts. Il faut considérer que dans de nombreux cas, la chlorose est plus un problème de mobilité du fer qu'une carence en fer ; ainsi, il n'est pas rare de constater que dans une même plante, il y a des zones avec une chlorose ferrique et d'autres sans. Les symptômes visuels caractéristiques sont les suivants :

- Les vieilles feuilles sont vertes, tandis que les jeunes feuilles commencent à jaunir. Différentes études montrent qu'il existe une corrélation entre la quantité de fer et la teneur en chlorophylle des feuilles.
- Au fur et à mesure que l'état de carence progresse, on observe une chlorose internervaire caractéristique ; seules les veines restent vertes, en contraste avec la couleur jaune ou blanc cassé du membre.
- En cas de carence extrême, le jaunissement peut devenir total et apparaît dans les zones nécrosées des bords du membre, entraînant une chute précoce des feuilles et, dans les cas extrêmes, une défoliation totale.
- Les pousses restent fines et courbées, ce qui entraîne une réduction importante de la croissance.
- Chez les plantes annuelles, on

observe une diminution de la croissance, un aspect rachitique, et une baisse de la production. Les arbres se défolient et commencent à se dessécher en périphérie ; les fruits sont petits et arrivent à maturité précocement.

### 3.3 COMMENT CORRIGER LA CHLOROSE FERRIQUE

La chlorose ferrique est considérée comme complexe, ce qui signifie que pour la corriger, il faut envisager diverses techniques de prévention et de traitement. La première solution est la sélection génétique des cultures, qui permet d'améliorer les mécanismes d'absorption du fer et de diminuer leur sensibilité à la chlorose ferrique [Charlson et al., 2003]. L'utilisation de cultivars tolérants est considérée comme la meilleure solution pour combattre cette carence dans les sols chaulés, bien que cette technique soit loin d'être une solution pour les arbres fruitiers et autres espèces [Álvarez-Fernández et al., 2003a]. Il s'agit d'une mesure préventive qui est prise avant la plantation. Néanmoins, une fois la culture établie, l'application de pratiques agricoles correctes est cruciale pour prévenir l'apparition de la chlorose ferrique [Chen, 1997]. Ces pratiques consistent à éliminer les risques de compaction, d'alcalinisation et d'inondation du sol, à privilégier un bon drainage et à contrôler la fréquence des risques. Une autre pratique, régulièrement utilisée avec les arbres fruitiers et les vignobles, est la culture conjointe avec d'autres plantes annuelles, ce qui permet de réduire la compaction et d'augmenter la porosité, la filtration et la teneur en matière organique du sol. Il s'agit d'une mesure préventive qui est prise avant la plantation. Néanmoins, une fois la culture établie, l'application de pratiques agricoles correctes est cruciale pour la prévention de la chlorose ferrique [Chen, 1997]. Dans les situations de

carence en fer, il convient de la corriger par l'application d'engrais avec ou sans fer dans le sol ou sur la plante. Dans les composés qui contiennent du fer, on trouve des complexes ferriques, des chélates de fer et des sels organiques ferriques ou ferreux qui augmentent la teneur en fer de la plante et du sol. Et, dans ceux qui ne contiennent pas de fer, on trouve des acidifiants et des matières organiques qui favorisent la solubilisation du fer natif non disponible. Ces traitements peuvent être appliqués au sol à l'état solide ou liquide, en fertirrigation ou en application foliaire.



HAUTE SENSIBILITÉ	MOYEN SENSIBILITÉ	FAIBLE SENSIBILITÉ
AGRUMES, VIGNE	LUZERNE	POMME
SORGHO	ORGE	POMME DE TERRE
PÊCHE	MAÏS	BETTERAVE
NOIX, POIRE	RIZ	
SOJA, ROSE	BLÉ	
FRAISE, TOMATE	AVOINE	
KIWI		

Tab.3 Sensibilité de différentes cultures à la carence en fer.

### Fig.14-19 Symptômes visibles de la chlorose ferrique dans les plantes



Fig.14 Chlorose ferrique en maïs



Fig.16 Chlorose ferrique en rose



Fig.18 Chlorose ferrique en cerise

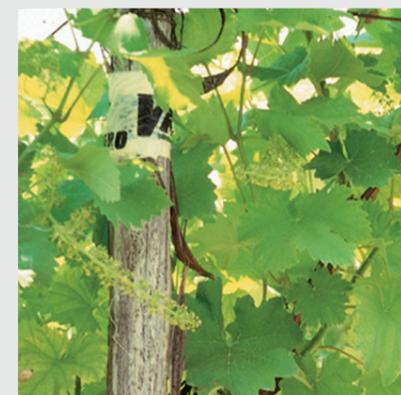


Fig.15 Chlorose ferrique en vigne



Fig.17 Chlorose ferrique en pêche



Fig.19 Chlorose ferrique en Azalées





4

Chélates

Angelo Squadrone, Luciano Di Sciullo, Antonio Menna, Giuseppe Iezzi, Antonio Coccia, Giulio Maria Cocco - Global Operations

4.1 LES MOLÉCULES CHÉLATANTS

Les agents chélateurs ou ligands sont des molécules organiques comportant deux ou plusieurs groupes fonctionnels capables de partager des paires d'électrons avec un ion métallique central. De cette façon, une structure cyclique est formée dans laquelle le métal est retenu, empêchant ainsi sa précipitation dans des conditions environnementales spécifiques.

Les chélates de fer représentent une forme plus soluble du fer et par conséquent l'absorption par les racines augmente. Il existe deux groupes d'agents chélateurs, qui sont tous deux des dérivés d'acides polyamino-carboxyliques, en fonction de la présence ou de l'absence de groupes phénoliques dans leur structure. D'une part, il y a les chélateurs qui ont une structure comme celle de l'EDTA, qui sont appelés non phénoliques, et d'autre part, il y a ceux qui contiennent des groupes phénoliques [EDDHA, EDDHSA...]. La figure 14 montre la structure des molécules d'o,o-EDDHA.

La structure des agents chélateurs phénoliques fournit six groupes fonctionnels donneurs d'électrons : deux acides carboxyliques, deux amines secondaires et deux phénols. La force de la coordination des groupes donneurs est liée à l'acidité du métal et à la basicité du proton de l'oxygène et de l'azote du donneur.

La meilleure capacité des agents chélateurs phénoliques est due à la présence de deux groupes phénoliques, qui sont plus basiques, et permet de maintenir efficacement le Fe<sup>3+</sup> en solution dans les sols chaulés [Lindsay, 1979].

	R1	R2
o,o-EDDHA	H	H
EDDHSA	SO <sub>3</sub> K	SO <sub>3</sub> K

Tab.4 Radicaux des agents chélateurs phénoliques.

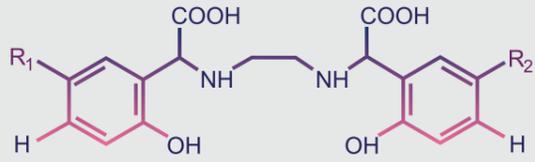


Fig.20 La structure de l'agent chélateur phénolique.

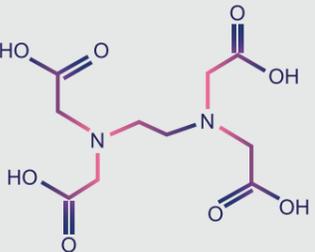


Fig.21 Structure d'EDTA.

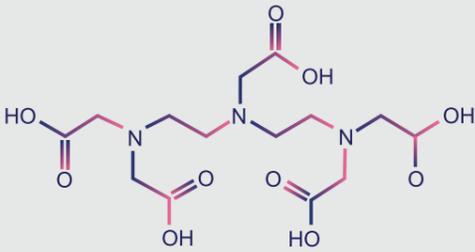


Fig.22 Structure de DTPA.

4.2 STABILITÉ DES CHÉLATES DU FER

Les facteurs qui affectent la stabilité des chélates de fer sont la structure de l'agent chélateur, le métal et les conditions environnementales [lumière, micro-organismes, température, force ionique, pH, pression partielle de CO<sub>2</sub>, potentiel redox et présence d'autres ions] [Álvarez-Fernández, 2000]. Les constantes de stabilité des différents agents chélateurs avec Fe<sup>3+</sup> sont reportées dans le tableau 5. On peut voir que les constantes de stabilité des chélates de fer phénoliques sont similaires les unes aux autres et considérablement supérieures à celles des non phénoliques, à l'exception de o,p-EDDHA/Fe<sup>3+</sup>.

Ces différences de stabilité sont fondamentalement attribuées à la structure des ligands. La stabilité des chélates de fer constitués de ligands hexadentés augmente avec le nombre de groupes phénoliques disponibles dans la coordination. Ainsi, la stabilité du chélate de fer augmente si les carboxylates sont remplacés par deux phénolates pour créer l'o,o-EDDHA, ou l'EDDHSA

[Tableau 5]. La stabilité des chélates de fer augmente également lorsque le nombre de groupes donneurs disponibles pour la coordination est dans une disposition octaédrique avec Fe<sup>3+</sup>. Par conséquent, la constante de stabilité plus faible pour o,p-EDDHA/Fe<sup>3+</sup> cDans le o,p-EDDHA/Fe<sup>3+</sup>, le groupe hydroxyle phénolique est en position para par rapport au carbone aliphatique, et par conséquent aucune liaison n'est faite avec le fer, et la position est occupée par une molécule d'eau [Yunta et al., 2003a].

EDTA	25,0
DTPA	27,3
o-o EDDHA	35,9
o-p EDDHA	28,72
EDDHSA	32,79
HBED	39,01

Tab. 5 Logarithme des constantes de stabilité [[FeL]/[Fe]-[L]] avec EDTA Fe<sup>3+</sup> et DTPA Fe<sup>3+</sup> [Martell et Smith, 1974] du régioisomère et des diastéréomères de o,o-EDDHA et EDDHSA [Yunta et al., 2003 a et b].

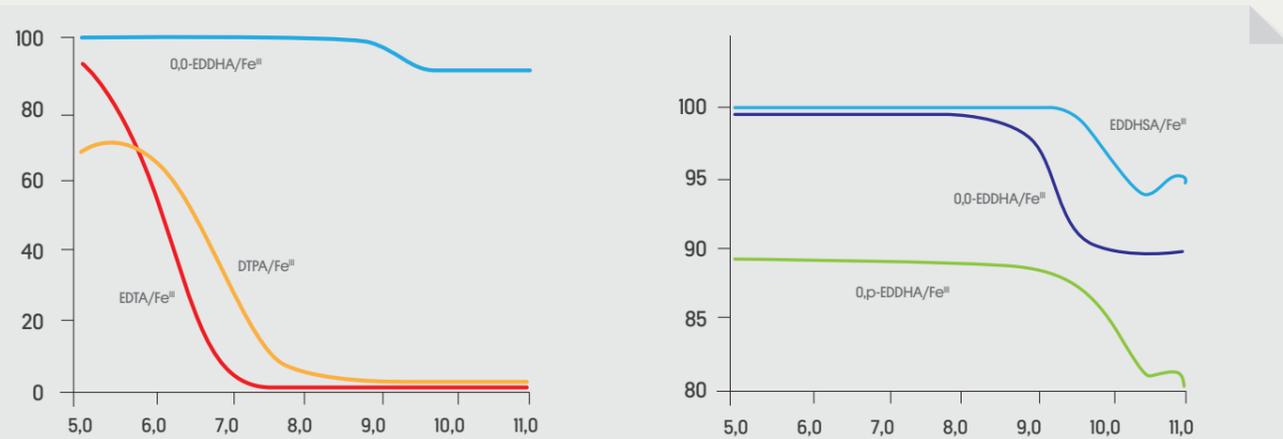


Fig.23 Diagrammes de stabilité de différents chélates ferriques dans le sol. [A] Comparaison des chélates de fer et du phénolique ou non, ou- EDDHA/Fe<sup>3+</sup>; Fig.24 Chélates de fer phénolique. Conditions : concentration de fer chélaté = 100 mM, concentration maximale de Cu<sup>2+</sup> = 10 M.

### 4.3 QUALITÉ DES CHÉLATES

Le degré de coordination entre le métal et les composés chélateurs aromatiques varie de 4 à 6 en fonction de la position de l'oxygène phénolique dans les molécules. Ainsi, l'o-o-EDDHA forme six liaisons, l'o-p EDDHA stabilise le fer avec cinq liaisons, et le p-p-EDDHA avec seulement quatre liaisons (comme ce qui se passe avec le fer EDTA). Le nombre de liaisons est un point fondamental pour influencer la stabilité des molécules chélatées susmentionnées, c'est-à-dire leur incapacité à empêcher le fer d'être insoluble dans un environnement alcalin.

Par conséquent, les produits commerciaux à base d'EDDHA contiennent toujours des isomères ortho-ortho, ortho-para ou para-

para ; la qualité du produit final est principalement liée au pourcentage d'isomère ortho, ortho, le complexe le plus stable.

### 4.4 LES CHÉLATES DE FER ET LEUR USAGE DANS L'AGRICULTURE

Les chélates de fer sont utilisés en agriculture pour satisfaire les besoins nutritionnels des cultures. Si les cultures se trouvent dans des conditions pédoclimatiques défavorables, les chélates peuvent être utilisés selon deux stratégies :

- Préventive, lorsque les symptômes visibles ne se sont pas manifestés et que l'objectif est d'éviter leur

manifestation.

- Curative, lorsque la chlorose ferrugineuse est visible, et que l'objectif est de retrouver un état nutritionnel correct de la plante. Sur la base de la modalité d'application, nous pouvons distinguer les chélates de fer principalement destinés à un usage radical (phénoliques : EDDHA, EDDHSA, HBED), et à un usage foliaire (non phénoliques : EDTA, DTPA). Les chélates phénoliques sont principalement utilisés dans les voies radicales car ils sont plus stables que les chélates non phénoliques dans les gammes de pH que l'on trouve normalement dans les terrains qui favorisent l'apparition de la carence en fer.

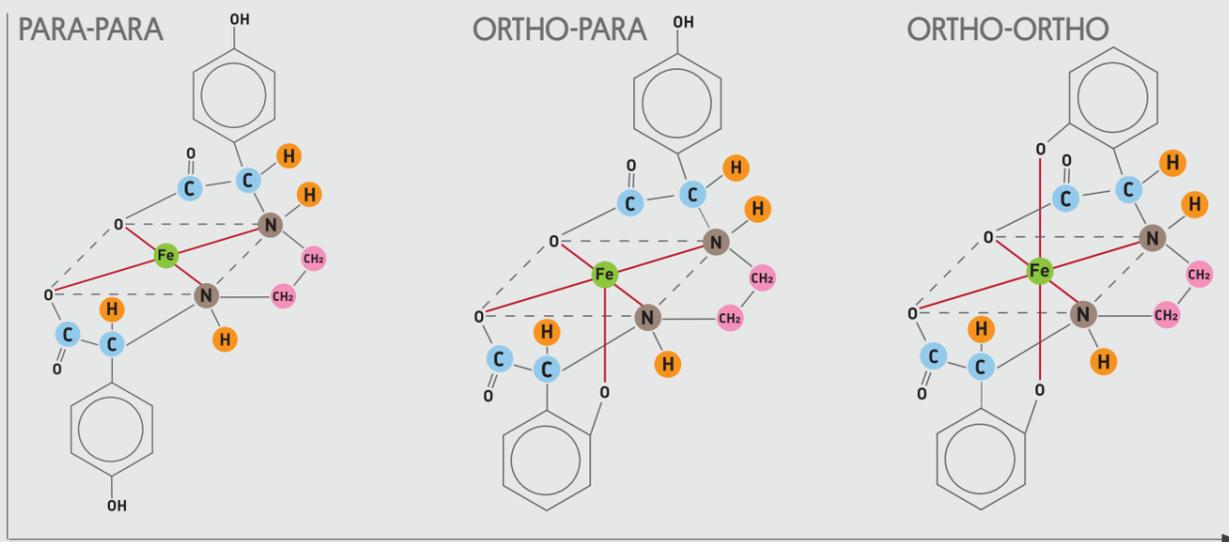


Fig.25 Qualité des différents isomères de l'EDDHA chélaté.

QUALITÉ

### 4.5 LES AGENTS CHÉLATEURS DANS LA GAMME FERRILENE PRODUITE PAR VALAGRO:

#### Fe-EDDHA

• Est un complexe dans lequel le fer est lié à une molécule organique par un plus grand nombre de liaisons de coordination (de préférence 6) dans l'isomère ortho-ortho.

• Dans ce complexe, le fer est entièrement disponible pour une absorption active par les racines.

• Sur le plan agronomique, la fraction o-o du complexe EDDHA confère au Fe une stabilité et une persistance dans le sol et est donc utile pour remédier aux carences en fer dans des conditions extrêmes.

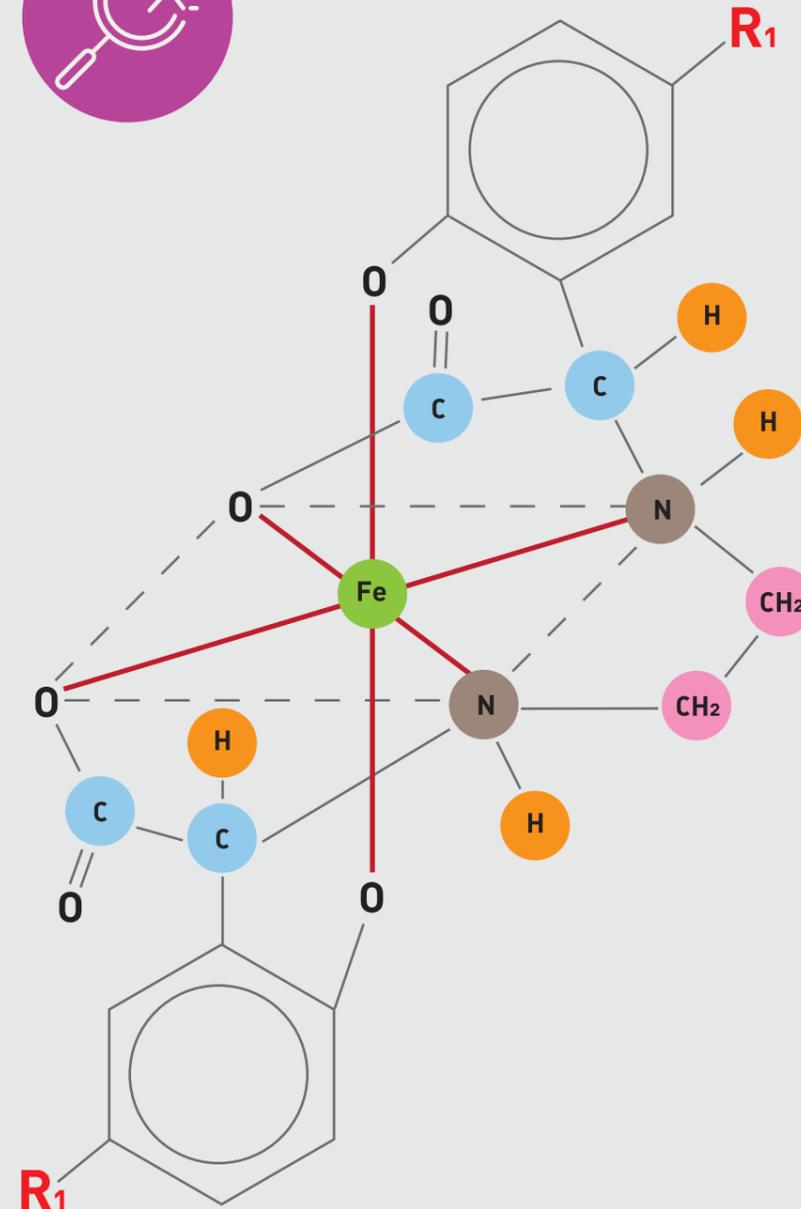
#### Fe-EDDHSA

• Diffère de la molécule EDDHA par la présence du groupe sulfonique en position para dans le cycle benzoïque du phénol structurel.

• Le sel de potassium est utilisé dans la synthèse ; des quantités suffisantes de potassium optimisent l'absorption du fer dans le tissu végétal.

• Sur le plan agronomique, le complexe EDDHSA confère au Fe une stabilité et une action rapide, ce qui augmente le reverdissement des plantes.

En outre, la solubilité du Fe-EDDHSA est environ 3,4 fois supérieure à celle du Fe-EDDHA. La présence de groupes sulfo rend les groupes phénoliques plus acides, ce qui entraîne une augmentation de l'affinité du fer pour ce chélateur. [Klem-Marciniak Molecules 2021, 26, 1933].



Fe-EDDHA	R1 = H
Fe-EDDHSA	R1 = SO <sub>3</sub> K

Fig. 26 Structure des agents chélateurs Fe-EDDHA, Fe-EDDHSA.





5

Gamme Ferrilene

Rita Basile - Global Marketing & Development

### 5.1 HISTOIRE DES AGENTS CHÉLATEURS

#### NOUS SOMMES FABRICANTS DE CHÉLATES !

Valagro produit directement des chélates de fer grâce à l'usine de synthèse de produits chélatés. La possibilité de produire directement des chélates de fer est importante pour vérifier et garantir la qualité des produits commercialisés.

La possibilité de fabriquer directement des chélates de fer est importante, car elle permet à Valagro de contrôler et de garantir la qualité des produits finaux. Les produits chélatés sont toujours contrôlés et analysés par notre laboratoire interne avant d'être emballés et commercialisés.

La gamme Ferrilene est une gamme complète des meilleurs chélates de fer disponibles (EDDHA ; EDDHA) pour répondre à des conditions défavorables spécifiques dans le sol où la disponibilité du fer est réduite. Ces chélates peuvent fournir du fer aux plantes dans une gamme de pH allant de 4 à 10. Le chélate augmente la solubilité du fer et transporte le fer jusqu'à la racine de la plante, où il le libère rapidement. La gamme comprend Ferrilene Trium, qui grâce à ses divers composants a la caractéristique d'avoir une triple action contre la chlorose ferrique ; la gamme Ferrilene comprend également Ferrilene 4.8 et Ferrilene.

#### HISTOIRE DE L'USINE DE CHÉLATES

En 1991, chez Valagro (à l'époque appelé Farmer), la construction du nouveau bâtiment de l'usine pour l'installation de chélates a commencé, dans laquelle le travail chimique de Valagro (Leo Giannantonio, actuellement directeur mondial Q-EHS & Compliance) a joué un rôle décisif, couvrant ainsi tous les besoins des terres agricoles, de leurs propriétaires, et plus encore. Issu de ce secteur spécifique, Leo a compris que les micronutriments chélatés n'étaient fabriqués que par une poignée d'industries dans le monde et que, bien qu'il s'agisse d'une activité de niche, même les petites productions garantissaient des marges économiques élevées. Il connaissait également les propriétés de ces molécules qui emprisonnaient le nutriment, comme les pinces (ou chélas) d'un crabe, le transportant



« Nous sommes des chimistes, c'est-à-dire des chasseurs [...] la nature est immense et complexe, mais elle n'est pas imperméable à l'intelligence ; il faut en faire le tour, la percer et la sonder, chercher l'ouverture ou la fabriquer ».  
Primo Levi

intact vers la plante et évitant sa solidification et sa dispersion dans le sol. L'expiration du brevet de Ciba pour les micronutriments chélatés signifiait qu'il n'était plus coûteux de les fabriquer, mais très peu d'industries le faisaient. Giuseppe et Ottorino ont réalisé qu'il serait plus économique de produire leurs propres produits, étant donné qu'ils disposaient déjà des installations. En effet, ils pourraient non seulement conditionner et vendre les chélates, mais aussi les utiliser pour fabriquer d'autres engrais, par exemple un type hydrosoluble, et bien sûr, la fabrication de leurs propres ingrédients garantirait la qualité qui était devenue le mantra de l'entreprise, car c'était le seul aspect qui pouvait la distinguer. Le pari des chélates a rapidement porté ses fruits. L'installation gérée par Pino Codagnone, qui

en est immédiatement devenu l'incarnation après avoir supervisé tout le processus d'installation, a fonctionné à pleine capacité au bout de deux ans, ce qui a permis d'augmenter considérablement le chiffre d'affaires. En effet, elle a élargi la clientèle potentielle de l'entreprise à d'autres types d'industries utilisant des micronutriments dans d'autres secteurs manufacturiers, ce qui a conduit Farmer à racheter la société Siso de Milan, l'usine même où travaillait Leo auparavant, et à devenir la seule entreprise italienne à fabriquer des agents chélateurs. Plus d'investissements, plus de recherche et développement, plus de revenus, plus de bénéfices : c'était un cercle vertueux, une voie clairement définie qui continuait à renforcer l'ensemble de la structure.

Source: 2020 Valagro Book- Creating the future. Since 1980

## 5.2

### FERRILENE 4,8 ET FERRILENE

[prévient et corrige la chlorose ferrique]

#### CARACTÉRISTIQUES

Dans cette dernière classification, nous trouvons différentes concentrations de fer chélaté ortho-ortho ainsi que les agents chélateurs de fer les plus importants, Fe-EDDHA [Ferrilene 4,8] et Fe-EDDHA [Ferrilene].

Ce groupe de chélates stables fournit efficacement du fer aux cultures dans des conditions difficiles et représente des outils importants dans le traitement et la prévention de la chlorose ferrique. Les isomères ortho-ortho et ortho-para sont actuellement inclus dans ce groupe de produits.

En résumé, dans la ligne Ferrilene, nous trouvons des produits stables face à l'hydrolyse, qui assurent l'absorption du fer dans des situations difficiles, qui ont un effet rapide et à long terme, dont le métal n'est pas facilement substitué par un autre métal, qui ne sont pas phytotoxiques, qui sont formés en microgranules solubles qui ne génèrent pas de poussière et qui assurent une solubilité rapide et totale.



## 5.3

### FERRILENE TRIUM

[triple action contre la chlorose ferrique]

#### CARACTÉRISTIQUES

Ferrilene Trium est la dernière innovation technologique de la gamme : fruit de la recherche et du développement, il marque un tournant dans le traitement de la chlorose ferrique par une approche

## COMPOSITION

PRODUIT	FERRILENE 4.8	FERRILENE
AGENT CHÉLATEUR	EDDHA	EDDHA
FER SOLUBLE DANS L'EAU	6%	6%
FRACTION CHÉLATÉE	100%	100%
% FER ORTHO-ORTHO	4.8%	3.8%

#### PRÉCONISATIONS D'EMPLOI ET DOSES

PRODUIT	FERRILENE 4.8	FERRILENE
FRUITS À PEPINS Kg/ha	5-30	10-30
FRUITS À NOYAU Kg/ha	5-30	10-30
FRAISE Kg/ha	5-15	5-15
AGRUMES Kg/ha	5-30	10-30
RAISIN DE TABLE Kg/ha	5-30	10-30
KIWI Kg/ha	5-30	10-30
MARAÎCHÈRES/ GRANDES CULTURES Kg/ha	5-15	5-15
FLORICULTURE Kg/ha	5-15	5-15
PLANTES EN POT g/plante	0,5 - 2	0,5 - 2

multi-stratégique. Ferrilene Trium fonde son action sur une série d'éléments interdépendants qui en font un produit intégral et unique parmi produits qui se concentrent sur la correction de la chlorose ferrique. FERRILENE TRIUM contient différents composants qui sont liés entre eux dans le complexe sol-plante comme le montre la figure suivante. Tout cela à l'intérieur de

microgranules minuscules, complexes et hautement solubles obtenus par une réaction chimique spécifiquement conçue pour VALAGRO, fruit de la vision de GEAPOWER, qui manifeste une fois de plus les connaissances et la technologie de Valagro dans la production et le développement de solutions adaptées à l'agriculture.

## COMPOSITION

1. Dans FERRILENE TRIUM il y a deux types de fer chélaté, Fe-EDDHA et Fe-EDDHA en position ortho-ortho ; le premier Fe-EDDHA se distingue par sa stabilité et sa persistance dans le sol. Le second Fe-EDDHA est un chélate stable et simultanément très soluble, ce qui lui confère la caractéristique d'une action rapide. Le sel de potassium est utilisé dans la synthèse du produit ; le potassium administré en quantité adéquate optimise l'absorption du fer, ce qui fait de la présence de potassium sous cette forme une caractéristique positive du produit.

2. FERRILENE TRIUM contient un rapport égal de fer et de manganèse ; c'est pourquoi, dans cette section, nous discuterons brièvement de l'importance du manganèse dans la plante. Ce micronutriment est absorbé par la plante principalement sous une forme divalente [Mn<sup>2+</sup>]. Sous cette forme, il se combine rapidement avec des ligands organiques dans lesquels il peut être rapidement oxydé en Mn (III) et Mn (IV). Le manganèse a diverses fonctions dans le métabolisme de la plante. Les études les plus documentées et exclusives sur le manganèse dans les plantes vertes sont celles qui rompent la molécule d'eau et le système d'évolution de l'O<sub>2</sub> de la photosynthèse qui se produit dans les chloroplastes et qui est appelée la réaction de Hill. Par conséquent, la carence en manganèse affecte principalement la photosynthèse et l'évolution de l'O<sub>2</sub>. En outre, il est un catalyseur de la synthèse de la chlorophylle et participe aux réactions d'oxydoréduction dans les plantes. Il forme une partie structurelle de la manganine, un constituant dans la synthèse du glutathion, l'activation de la méthionine, le contrôle des hormones et la synthèse des protéines. Le manganèse [Mn] agit également comme un cofacteur important pour diverses enzymes fondamentales dans la biosynthèse des métabolites secondaires de la plante associés à la voie de l'acide shikimique, notamment

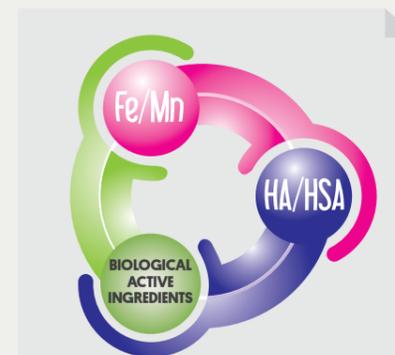


Fig. 27 Composants de FERRILENE TRIUM.

les acides aminés aromatiques phénoliques, les coumarines, la lignine et les flavonoïdes. La présence actuelle de fer et de manganèse dans Ferrilene Trium sous forme de chélates très stables permet de maintenir une relation réciproque optimale entre les deux éléments, évitant ainsi le phénomène de chlorose secondaire.

3. La présence d'ingrédients biologiquement actifs fait de Ferrilene Trium un produit unique qui offre une réponse intégrale dans le traitement et la prévention de la chlorose ferrique. La triple action de Ferrilene Trium est :

ACTION	RÉSULTAT
1. Facilite l'absorption du fer grâce à deux agents chélateurs distincts, Fe-EDDHA/ Fe-EDDHA.	Agit rapidement [EDDHA] et est persistant [EDDHA] dans la guérison et la prévention de la chlorose ferrique.
2. Donne à la plante le bon équilibre de Fe/Mn	Assure une relation optimale entre les deux éléments, améliorant les fonctions métaboliques de la plante et la guérison de la chlorose ferrique causée par la carence en Fe et Mn.
3. Les ingrédients actifs biologiques améliorent l'activité des portes à protons.	Améliore la capacité d'absorption de la plante, la rendant plus forte et plus vigoureuse.

Les composants biologiquement actifs à activité biostimulante agissent directement sur la racine en augmentant les niveaux d'absorption du fer et du manganèse et en améliorant le contenu en chlorophylle des feuilles.

#### 5.2.3 PRÉCONISATIONS ET DOSES (IRRIGATION FERTILISANTE)

PRODUIT	FERRILENE TRIUM
POMACÉS	10-30 Kg/ha
DRUPACÉS	10-30 Kg/ha
FRAISE	5-15 Kg/ha
AGRUMES	10-30 Kg/ha
RAISIN DE TABLE	10-30 Kg/ha
KIWI	10-30 Kg/ha
MARAÎCHÈRES/ GRANDES CULTURES	5 -15 Kg/ha
FLEURS	5-15 Kg/ha
PLANTES EN POT	0.5 - 2 g/plant

PRODUIT	FERRILENE TRIUM
AGENT CHÉLATEUR	EDDHA/ EDDHA
FER SOLUBLE DANS L'EAU	6%
FRACTION CHÉLATÉE	100%
% FER ORTHO-ORTHO	4.0%
MANGANÈSE [Mn-EDTA]	1%
POTASSIUM [K <sub>2</sub> O]	6%





# 6

## L'approche phénomique

Stefano Di Russo - Plant phenotyping associate

### 6. L'APPROCHE PHÉNOMIQUE SUR LE KIWI

À l'aide du système Scanalyzer 3D, nous obtenons des images à différentes longueurs d'onde [RGB, UV, NIR] et observons les effets du prototype analysé sur le phénotype de la plante.

La standardisation des conditions de croissance des plantes [irrigation, microclimat, sols] et la gestion informatisée des données nous permettent d'analyser efficacement les résultats de plus de 3 000 plantes par jour.



Fig. 28 Système Scanalyzer 3D.

*Nous commençons à voir l'essai sur le kiwi, variété hayward, Dans cet essai 7 différents chélates ont été testés par rapport au test non traité. Une application pour chaque chélate quand la chlorose est apparue a été faite.*

#### Information général

Localisation	Metaponto (sud de l'Italie)
Variété	Hayward
Retour [p/ha]	-
Niveau d'essai	II



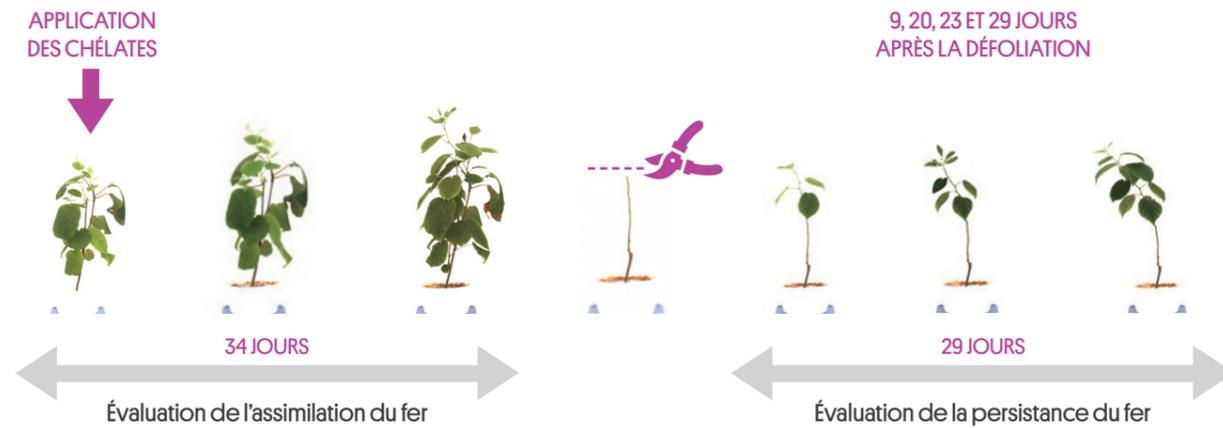
#### Date et stade de croissance des applications

N°	Traitement	Date	Stade de croissance
1°	A	04/07/2012	Quand la chlorose apparaît

#### Traitements

Traitement	Dose	N. d'applications	Volume d'eau	Date des traitements
FERRILENE 4,8	5 g/plante	1	100 ml/plante	A
TRIUM	5 g/plante	1	100 ml/plante	A
Non traitée	-	-	-	-

Dans ces essais, nous avons évalué l'assimilation du fer jusqu'à 34 jours après l'application des chélates. Ensuite, nous avons enlevé les feuilles pour évaluer la persistance du fer dans le sol jusqu'à 29 jours après la défoliation. Dans les deux cas, nous avons détecté une biomasse numérique, une augmentation des classes de couleur et une faible fluorescence. Nous commençons à voir l'évaluation de l'assimilation du fer.

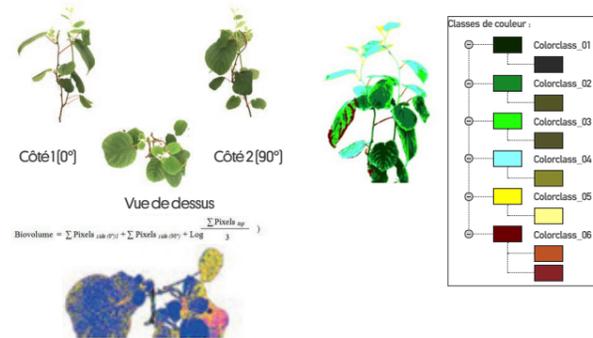


**1. RGB [Red-Green-Blue] → croissance et couleur**

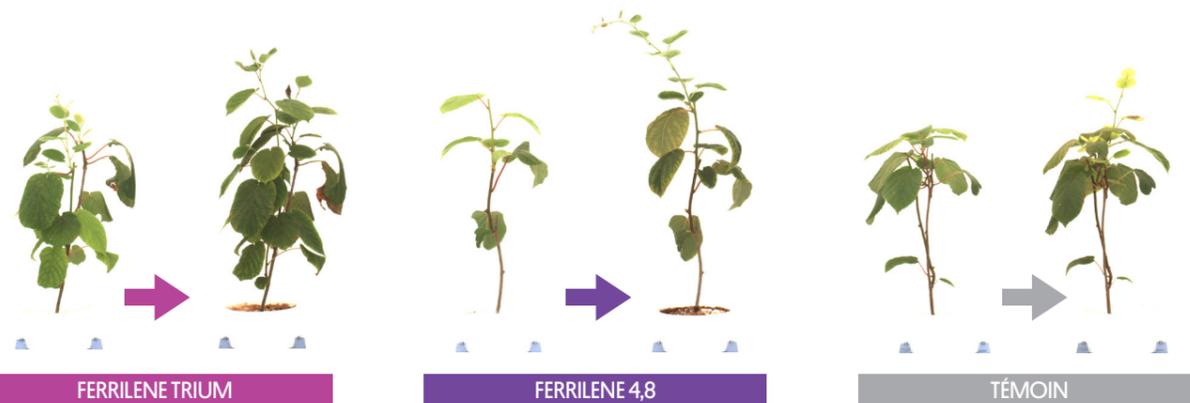
- Biomasse numérique
- Augmentation des classes de couleur

**2. UV [ultraviolet] → activité photosynthétique**

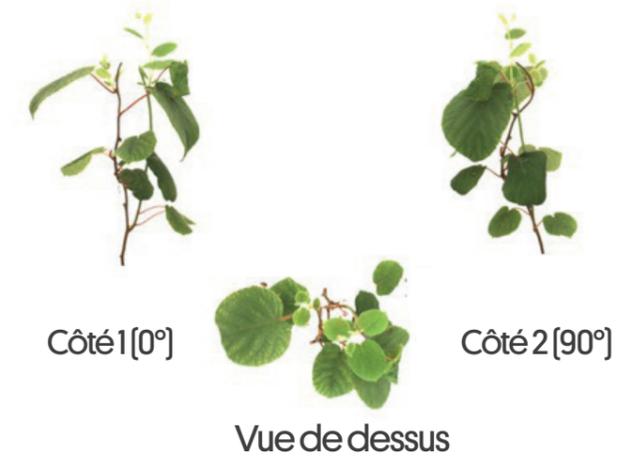
- Faible fluorescence



**RGB: ÉVALUATION DE L'ASSIMILATION DU FER - BIOMASSE NUMÉRIQUE**

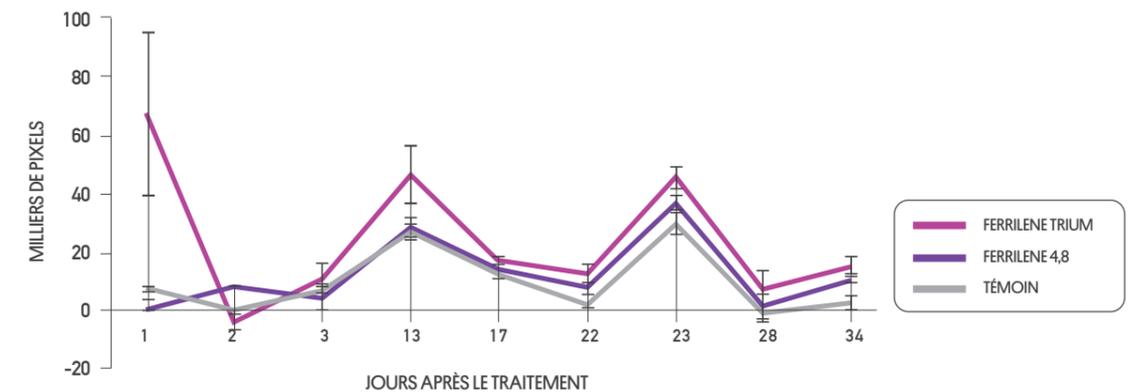


Ce sont des images prises dans la chambre RGB avant l'application. Voyons la croissance de la plante après l'application des chélates. Voici la situation 34 jours après l'application. Comme vous pouvez le voir, le test non traité a montré quelques feuilles apicales jaunes par rapport aux autres traitements.



$$\text{Biovolume} = \frac{\sum \text{Pixels}_{\text{side}(0^\circ)} + \sum \text{Pixels}_{\text{side}(90^\circ)} + \text{Log} \left( \frac{\sum \text{Pixels}_{\text{top}}}{3} \right)}$$

Dans la chambre RGB nous avons pris pour chaque traitement 3 images différentes : De côté, vue de dessus et de côté à 90 degrés ; puis, grâce à cette formule, la station informatique a calculé la biomasse numérique.



Le prototype Ferrilene 4,8 a montré le meilleur résultat en termes de biomasse numérique. Ensuite, nous avons évalué l'augmentation des classes de couleur du vert foncé au brun.



## AUGMENTATION DES CLASSES DE COULEUR

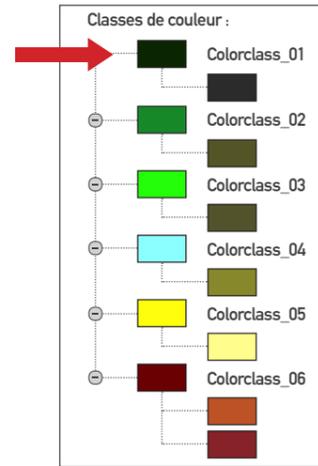
FERRILENE TRIUM



FERRILENE 4,8

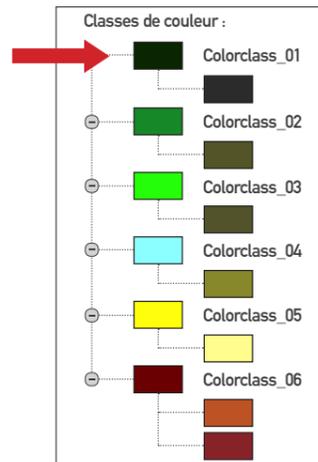
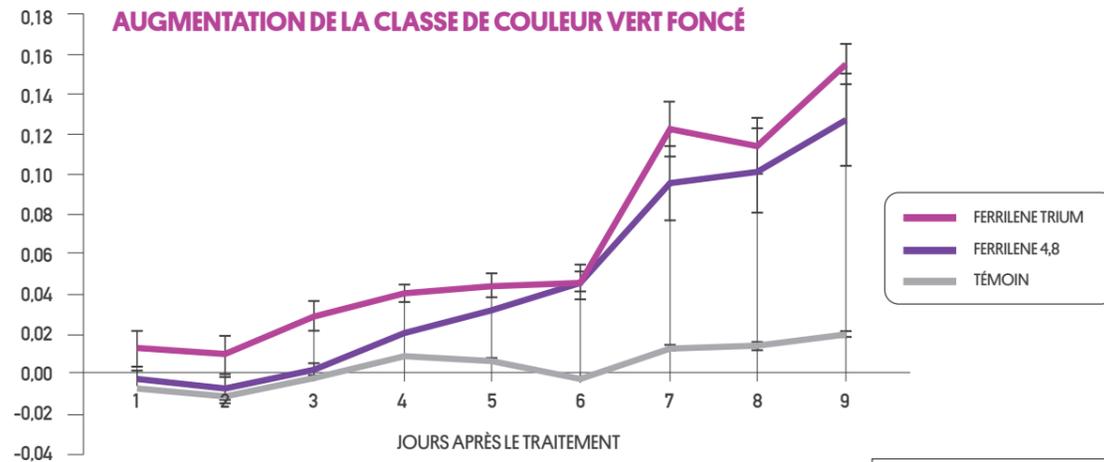


TÉMOIN



C'est la situation avant les traitements... alors qu'elles ont été prises 34 jours après l'application. Maintenant nous allons voir les résultats concernant l'augmentation des couleurs vert foncé et jaune qui sont les classes de couleurs les plus représentatives.

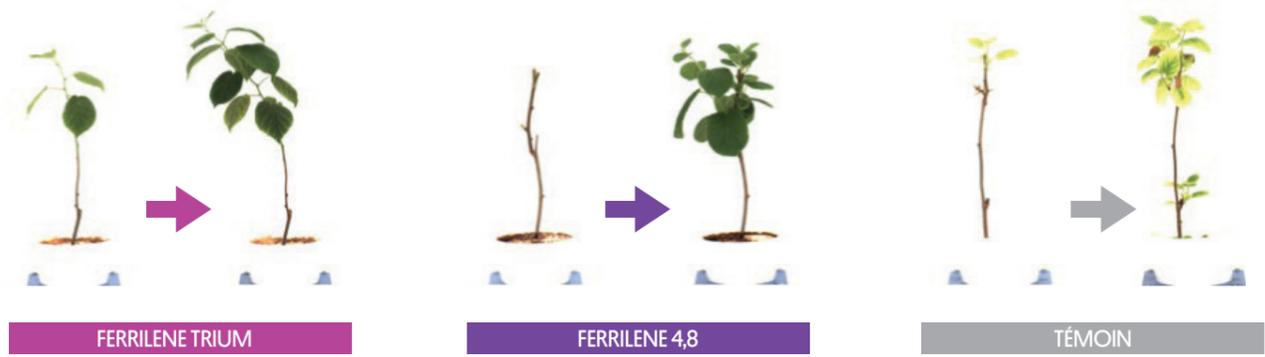
## AUGMENTATION DE LA CLASSE DE COULEUR VERT FONCÉ



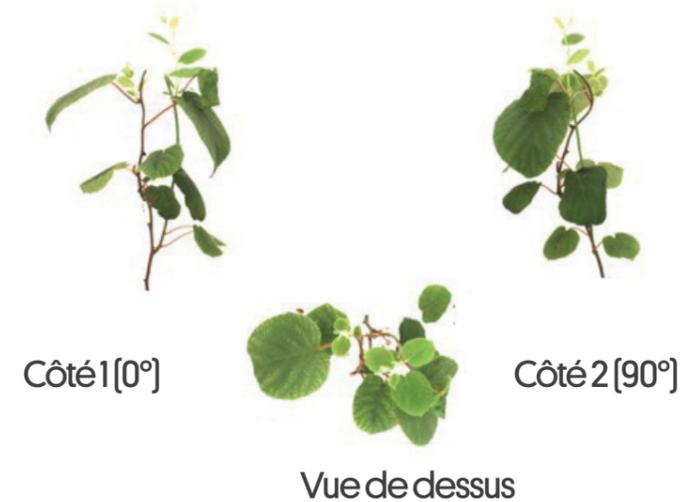
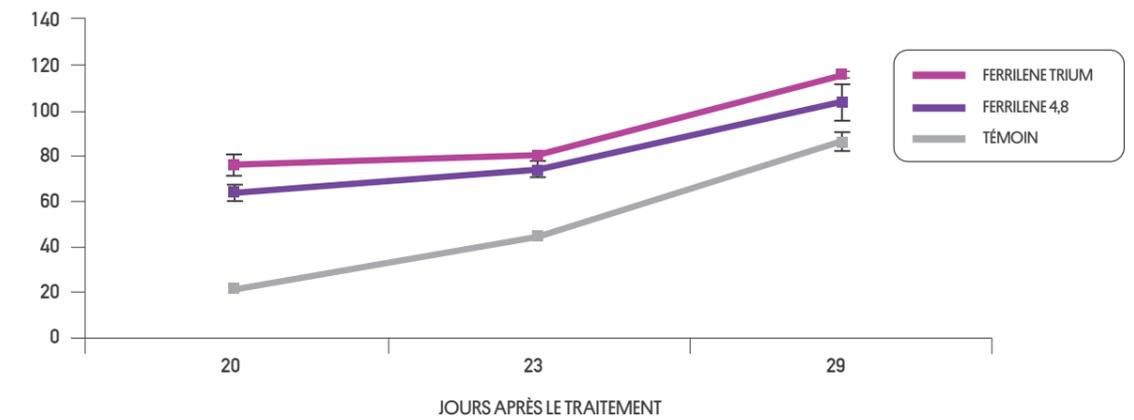
Le premier groupe de chélates, qui comprend le Ferrilène 4,8 et le Ferrilène Trium, a montré les meilleurs résultats.

## RGB : ÉVALUATION DE LA PERSISTANCE - BIOMASSE NUMÉRIQUE

Nous allons maintenant voir la persistance du fer dans le sol après la défoliation des plantes.



C'est dans la chambre RGB... où il est possible de voir une nette différence entre les plantes traitées et le test non traité qui montrait beaucoup de chlorose.



$$\text{Biovolume} = \sum \text{Pixels}_{\text{side}(0^\circ)} + \sum \text{Pixels}_{\text{side}(90^\circ)} + \text{Log} \left( \frac{\sum \text{Pixels}_{\text{top}}}{3} \right)$$



**AUGMENTATION DES CLASSES DE COULEUR**

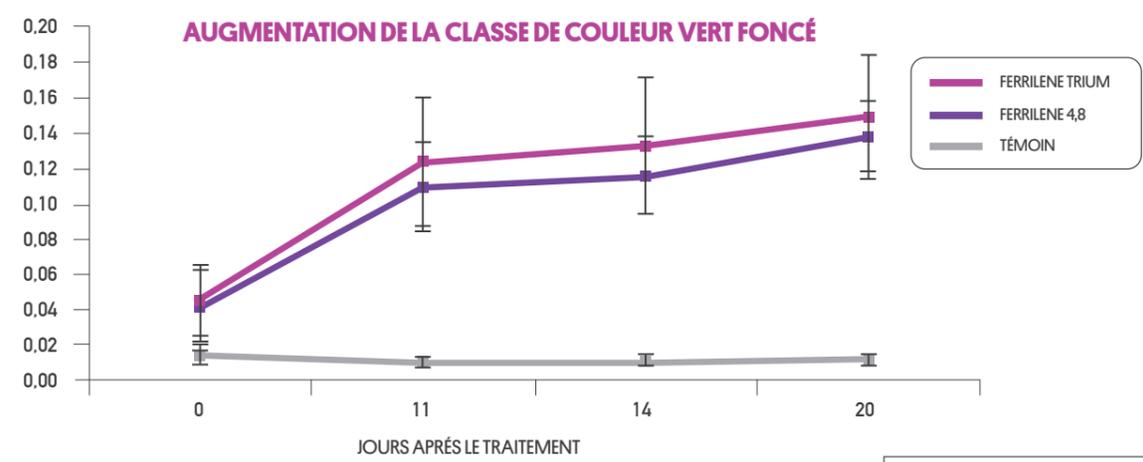
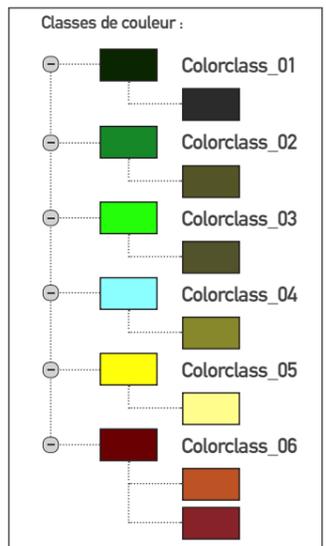
FERRILENE TRIUM



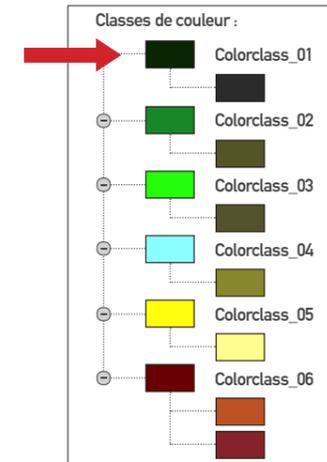
FERRILENE 4,8



TÉMOIN



Tous les prototypes ont augmenté la classe vert foncé.



**7**  
**Essais agronomiques**

# FERRILENE 4,8 Pêche

**LOCALISATION**  
Catania - Italie

**VARIÉTÉ**  
Baby gold 7

**MÉTHODE D'APPLICATION**  
Irrigation fertilisante localisée



**Information sur la culture et description du sol**  
ID Essai : **FERRILENE12.OPEAC.01ITA\_X**



Distance entre les lignes	4,5 m
Distance sur les rangs	2,0 m
p/ha	1000



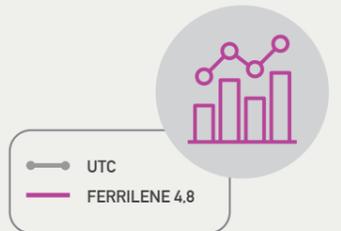
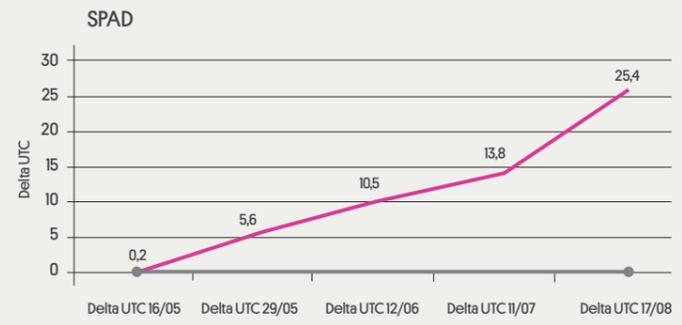
Les sols à forte teneur en carbonates et à pH élevé, où le fer [Fe] est naturellement indisponible pour la plante, et doit être complété dans le sol par des engrais à base de chélates de fer.

### Protocole d'essai

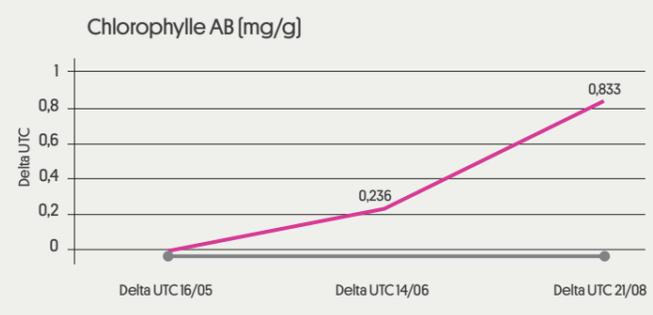
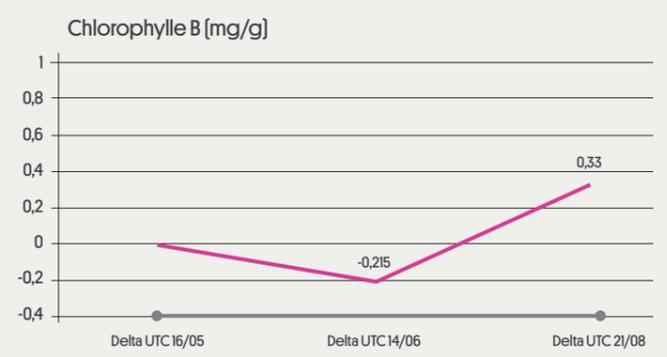
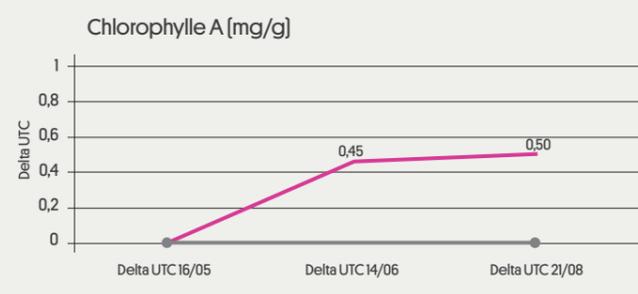
PRODUIT	N. d'applications	Doses [kg/ha]	1ère application	2ème application	3ème application
TÉMOIN	-	-	-	-	-
FERRILENE 4,8	3	5	16/05 Développement du fruit	29/05	26/06

Des applications d'engrais à la volée ont été effectuées aux niveaux de production standard. Des applications d'entretien d'herbicides de pré- et post-levée ont été effectuées dans toute la zone d'essai, selon les besoins.

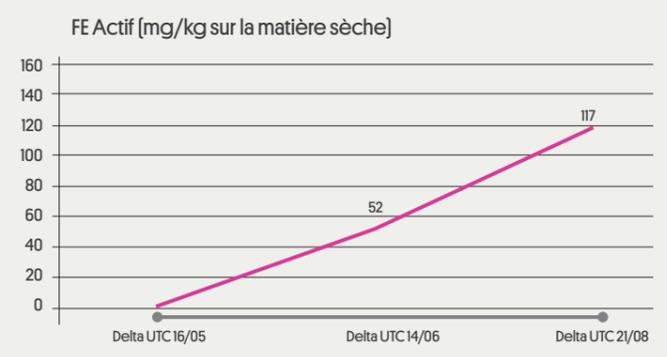
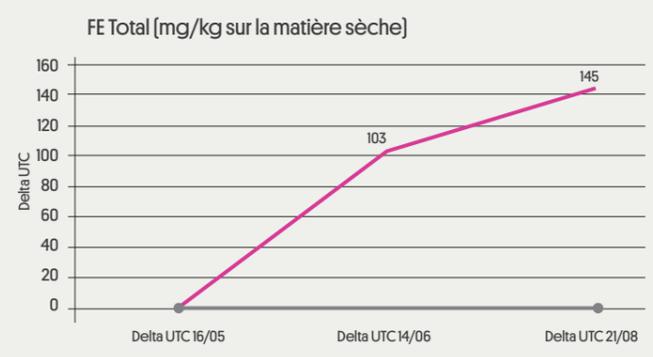
### Résultats SPAD vs UTC



### Résultats CHLOROPHYLLE vs UTC



### Résultats FE (mg/kg) vs UTC



## FERRILENE TRIUM

### Tomate - serre



**LOCALISATION**  
Catania - Italie



**VARIÉTÉ**  
Icram



**MÉTHODE D'APPLICATION**  
Irrigation fertilisante localisée



#### Information sur la culture et description du sol

ID Essai :  
**FERRILENE12.VTOFR.01ITA\_X**



Distance entre les lignes	1,00 m
Distance sur les rangs	0,33 m
p/ha	30000

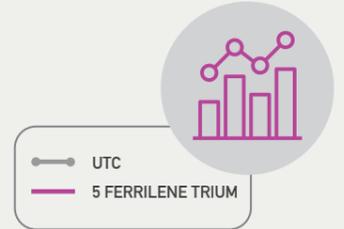
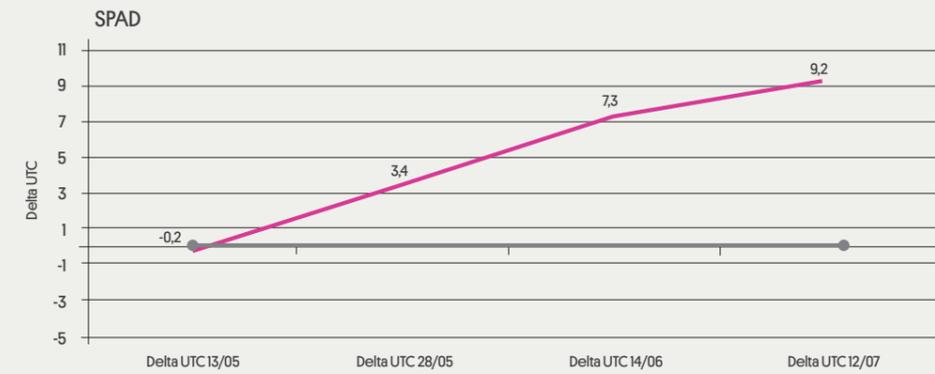


Les sols à forte teneur en carbonates et à pH élevé, où le fer [Fe] est naturellement indisponible pour la plante, et doit être complété dans le sol par des engrais à base de chélates de fer.

#### Protocole d'essai

PRODUIT	N. d'applications	Doses (kg/ha)	1ère application	2ème application
TÉMOIN	-	-	-	-
FERRILENE TRIUM	2	5	13/05 Floraison - 6ème Grappe	16/06 Maturation - 1ère Grappe

#### Résultats SPAD vs UTC



# FERRILENE

## Raisin de Table

**LOCALISATION**  
Catania - Italie

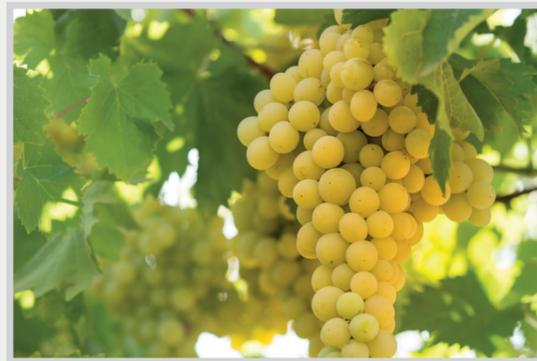
**VARIÉTÉ**  
Italie

**MÉTHODE D'APPLICATION**  
Irrigation fertilisante localisée



### Information sur la culture et description du sol

ID Essai :  
**FERRILENE12.OGRTA.0IITA\_X**



Distance entre les lignes	3,00 m
Distance sur les rangs	3,00 m
p/ha	1000

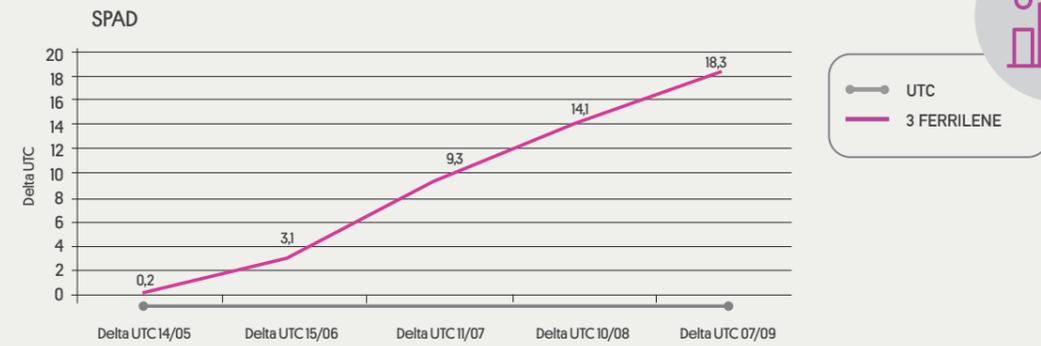


Les sols à forte teneur en carbonates et à pH élevé, où le fer [Fe] est naturellement indisponible pour la plante, et doit être complété dans le sol par des engrais à base de chélates de fer.

### Protocole d'essai

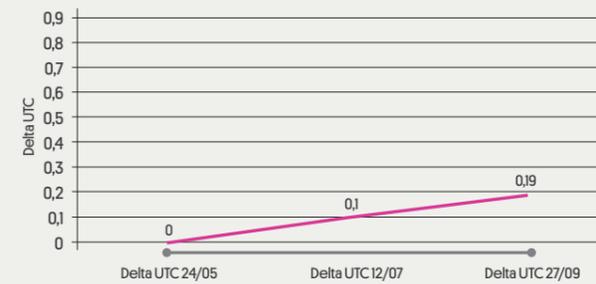
PRODUIT	N. of applications	Doses [kg/ha] 1ère application	Doses [kg/ha] 2ème application	1ère application	2ème application
TÉMOIN	-	-	-	-	-
FERRILENE	2	5	10	24/05 Floraison	11/07 Développement du fruit

### Résultats SPAD vs UTC

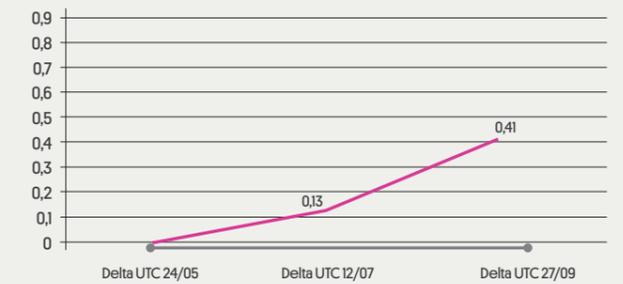


### Résultats CHLOROPHYLLE vs UTC

Chlorophylle A (mg/g)



Chlorophylle B (mg/g)

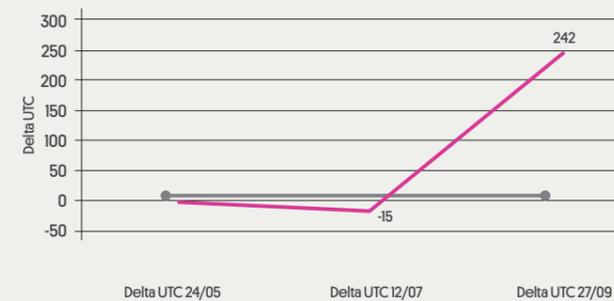


Chlorophylle AB (mg/g)

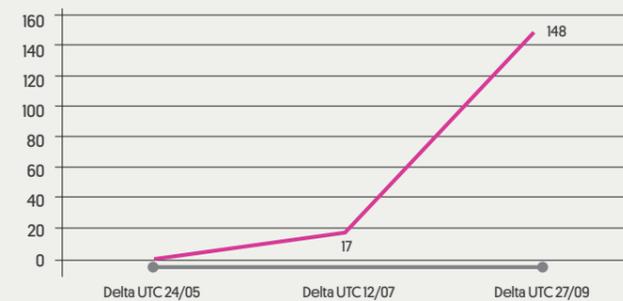


### Résultats FE (mg/kg) vs UTC

FE Total (mg/kg sur la matière sèche)



FE Actif (mg/kg sur la matière sèche)



## FERRILENE 4,8

### Poire



#### LOCALISATION

Ferrara - Italie



#### VARIÉTÉ

Abate Fétel



#### MÉTHODE D'APPLICATION

Irrigation fertilisante localisée



#### Information sur la culture et description du sol

ID Essai :  
FERRILENE12.OPEAR.01ITA\_X



Distance entre les lignes	3,30 m
Distance sur les rangs	0,70 m
p/ha	4329

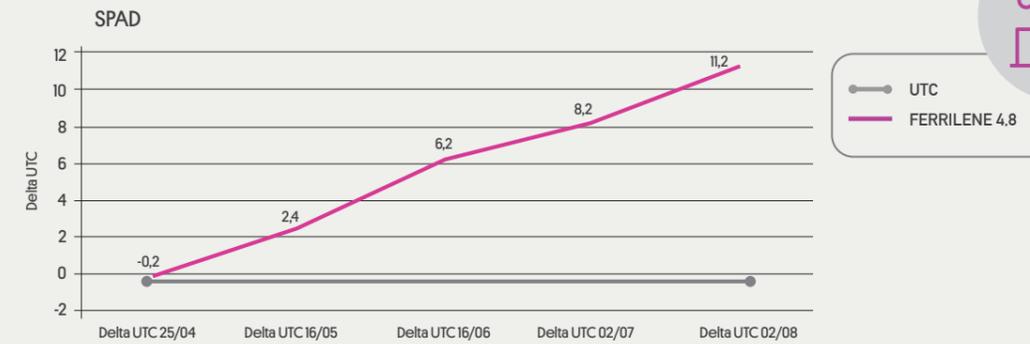


Les sols à forte teneur en carbonates et à pH élevé, où le fer [Fe] est naturellement indisponible pour la plante, et doit être complété dans le sol par des engrais à base de chélates de fer.

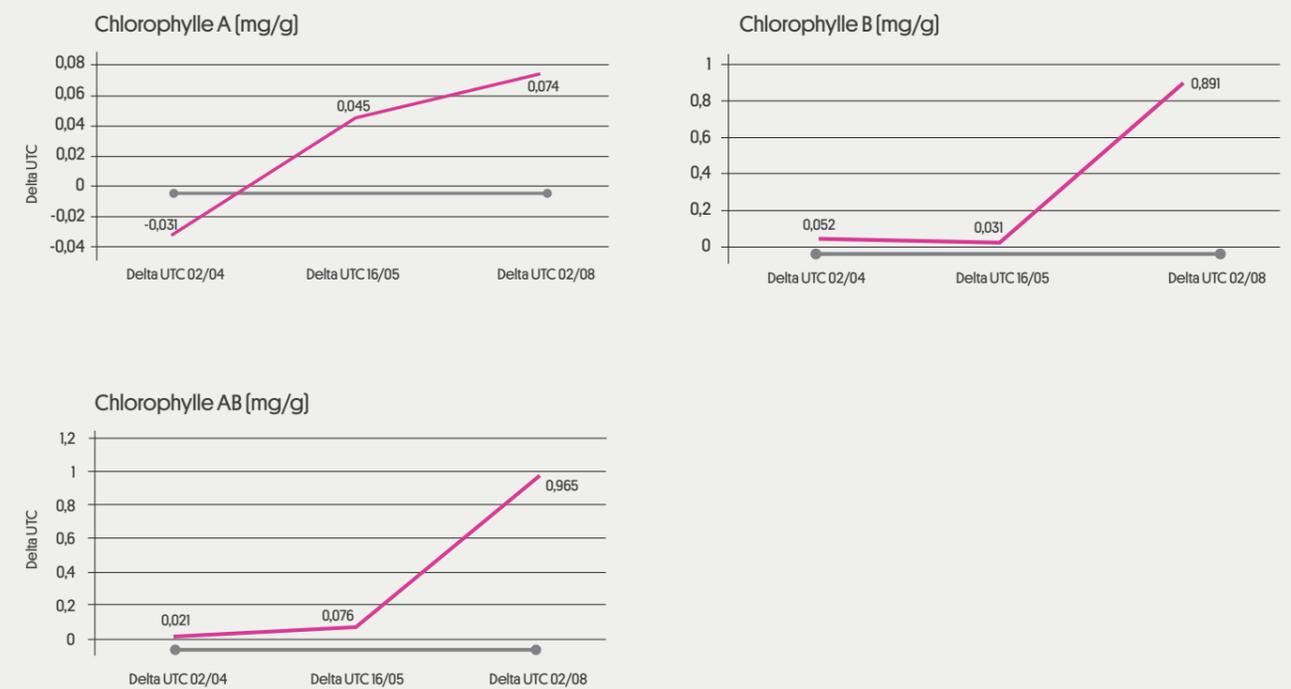
#### Protocole d'essai

PRODUIT	N. d'applications	Doses [kg/ha] 1ère application	1ère application
TÉMOIN	-	-	-
FERRILENE 4,8	1	20	25/04 Floraison

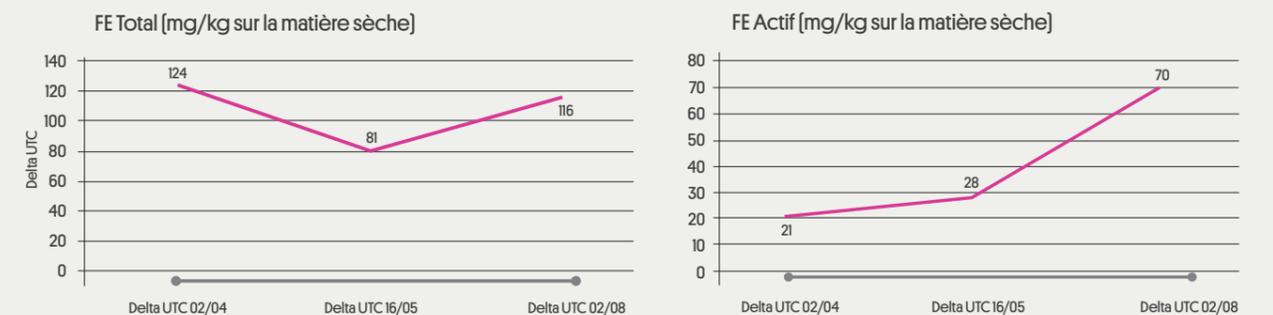
#### Résultats SPAD vs UTC



#### Résultats CHLOROPHYLLE vs UTC



#### Résultats FE (mg/kg) vs UTC



## FERRILENE TRIUM

### Vigne



#### LOCALISATION

San Michele all'Adige - Italie



#### VARIÉTÉ

Cabernet franc



#### MÉTHODE D'APPLICATION

Irrigation fertilisante localisée



#### Information sur la culture et description du sol

ID Essai : FERRILENE12.OGRWI.0IITA\_MACH\_X



Distance entre les lignes	2,2 m
Distance sur les rangs	0,9 m
p/ha	5050



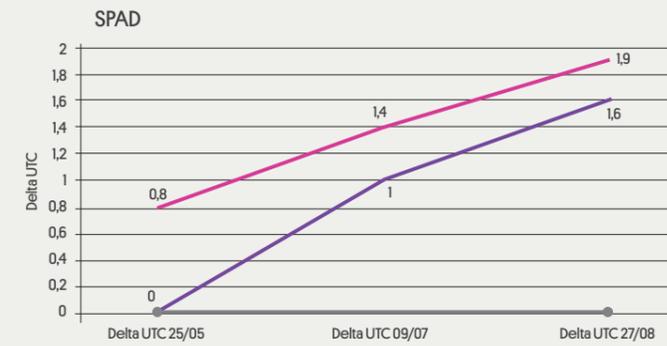
Les sols à forte teneur en carbonates et à pH élevé, où le fer [Fe] est naturellement indisponible pour la plante, et doit être complété dans le sol par des engrais à base de chélates de fer.

% Sable	58	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ppm	80
% Silt	34	K <sub>2</sub> O ppm	75
% Argile	8	MgO ppm	230
pH	7.8	CaCO <sub>3</sub> %	60
% Substance Organique	2.8	CEC meq/100 gr	13

#### Protocole d'essai

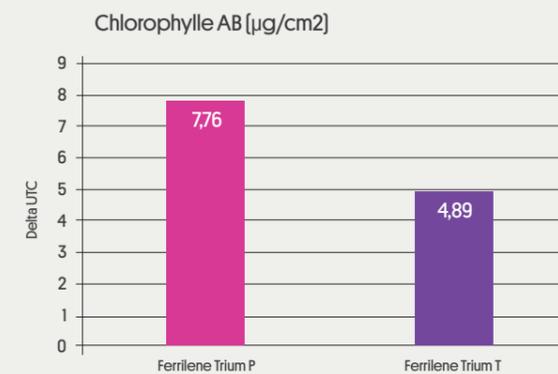
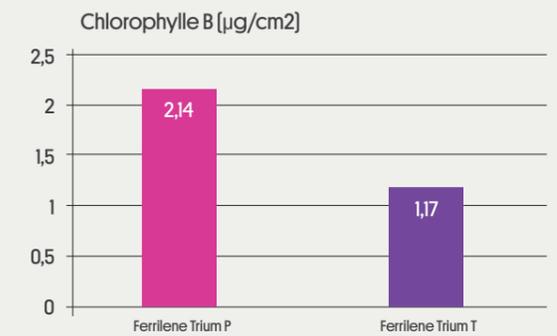
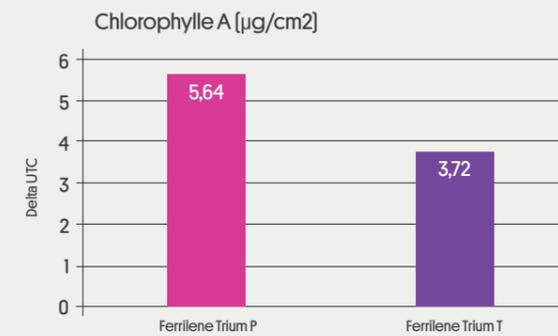
PRODUIT	N. d'applications	Doses (kg/ha)	1ère application
TÉMOIN	-	-	-
FERRILENE TRIUM P (préalable)	1	10	26/04
FERRILENE TRIUM T (Traitement tardive)	1	10	07/06

#### Résultats SPAD vs UTC

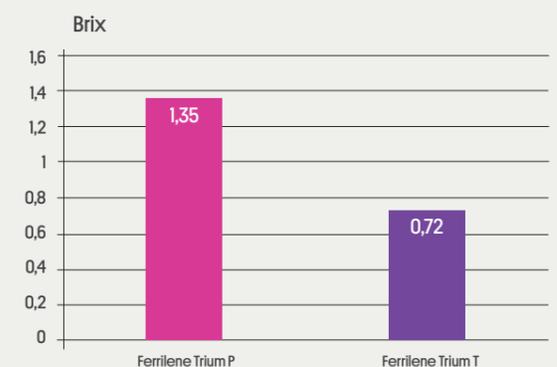
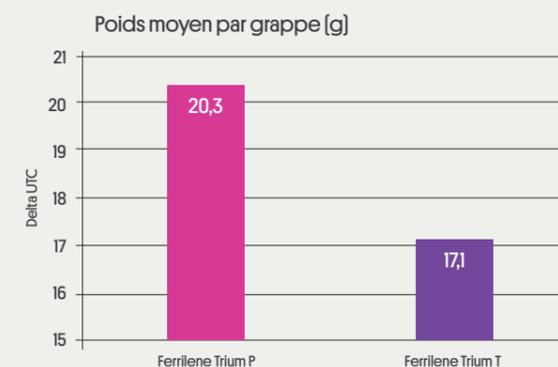


UTC  
FERRILENE TRIUM P  
FERRILENE TRIUM T

#### Résultats CHLOROPHYLLE vs UTC



#### Résultats





# 8

## Bibliographie

**Abadía J.** 1998. Absorción y transporte de Fe en las plantas. Pp.: Xiii-xxiv. En: actas del VII simposio nacional-III ibérico sobre nutrición mineral de las plantas. Ed. Universidad autónoma de Madrid. Madrid, España.

**Abadía a, sanz m, de las rivas j y abadía j.** 1989. Photosynthetic pigments and mineral composition of Fe deficiency pear leaves. *J. Plant Nutr.* 12:827-838.

**Alam, s.; Kamei, s.; Kawai, s.** 2001. Effects of iron deficiency on the chemical composition of the xylem sap of barley. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47(3): 643-649.

**Álvarez-fernández a.** 2000. Calidad y eficacia de quelatos férricos [Fe-EDDHA, Fe-EDDHA, Fe-EDDHA y Fe-EDDHA] como fertilizantes. Tesis doctoral. Pp.:463. Universidad autónoma de Madrid.

**Álvarez-fernández a, cremonini m a, sierra m a, placucci g y lucena j j.** 2002A. Nature of impurities in fertilizers containing EDDHA/Fe<sup>3+</sup>, EDDHA/Fe<sup>3+</sup> and EDDHA/Fe<sup>3+</sup> chelates. *J. Agri. Food Chem.* 50(2):284-290.

**Álvarez-fernández a, sierra m a y lucena j j.** 2002B. Reactivity of synthetic Fe chelates with soils and soil components. *Plant Soil* 241(1):129-137.

**Álvarez-fernández a, abadía a, abadía j y lucena j j.** 2003A. Diagnóstico y corrección de la clorosis férrica. En: I Congreso Iberoamericano de nutrición vegetal-agro latino. *Nutri-fitos* 2003. Tomo 2. Pp.:158-166.

**Alvarez-Fernandez, et al.,** 2006; Chen and Barak, 1982; Hansen, et al., 2006; Mortvedt, 1991

**Awad, f., Römheld, v., Marschner, h.** 1988. Mobilization of ferric iron from a calcareous soil by plant-borne chelators. *J. Plant Nutr.* 11:701.

**Becker, r.; Grün, m; scholz, g.** 1992. Nicotinamide and the distribution of iron in the apoplast and symplast of tomato [*Lycopersicon esculentum* Mill] planta. 187: 48-52.

**Beinert, h.; Kennedy, m. C.** 1989. Engineering of protein bound iron-sulfur clusters. A tool

for the study of protein and cluster chemistry and mechanism of iron-sulfur enzymes. *Eur. J. Biochem.* 186: 5-15.

**Bienfait h f.** 1985. Regulated redox processes at the plasmalemma of plant root cells and their function in iron uptake. *J. Bioenerg. Biomembr.* 17(2):73-83.

**Bienfait h f.** 1988B. Proteins under control of the gene for Fe efficiency in tomato. *Plant Physiol.* 88(3):785-787.

**Black, R.E.; Allen, L.H.; Bhutta, Z.A.; Caulfield, L.E.; de Onis, M.; Ezzati, M.; Mathers, C.; Rivera, J.** Maternal and child undernutrition: Global and regional exposures and health consequences. *Lancet* 2008, 371, 243-260

**Brown j, c.; jolley v. D.** 1988. Strategy i strategy ii mechanism affecting iron availability to plants may be established too narrow or limited. *J. Plant Nutr.* 11:1077-1098.

**Brüggemann w, maas-kantel k y moog p r.** 1993. Iron uptake by leaf mesophyll cells: the role of the plasma membrane-bound ferric-chelate reductase. *Planta* 190(2):151-155.

**Cambell, w.H. Y redinbaugh, m.G.** 1984. Ferric-citrate reductase activity of nitrate reductase and its role in iron assimilation by plants. *J. Plant Nutr.* 7:799-806.

**Chaney r I.** 1984. Diagnostic practices to identify iron-deficiency in higher plants. *J. Plant Nutr.* 7(1-5):47-67.

**Charlson d v, cianzio s r y shoemaker r c.** 2003. Associating SSR markers with soybean resistance to iron deficiency chlorosis. *J. Plant Nutr.* 26(10-11):2267-2276.

**Chen y y barak p.** 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Adv. Agron.* 35:217-240.

**Chen y.** 1997. Remedy of iron deficiency - present and future. En: abstracts 9th international symposium on iron nutrition and interactions in plants. Pp.: III. Hohenheim, stuttgart, Germany.

**Curie c, panaviene z, loulergue c, dellaporta s I, briat j f y walker e I.** 2001. Maize yellow

stripe 1 encodes a membrane protein directly involved in Fe(III) uptake. *Nature* 409(6818):346-349.

**De la guardia m d y alcántara e.** 1996. Ferric chelate reduction by sunflower [*Helianthus annuus* L.] Leaves: influence of light, oxygen, iron-deficiency and leaf age. *J. Exp. Bot.* 47(298):669-675.

**Droillard, m. J.; Paulin,** 1990. Isoenzymes of superoxide dismutase in mitochondria and superoxide isolated from petals of carnation [*Dianthus caryophyllus*] during senescence. *Plant Physiol* 94:1187-1192.

**FAO; IFAD; WFP.** The State of Food Insecurity in the World 2015. Meeting the 2015 International Hunger Targets: Taking Stock of Uneven Progress 2015. Available online: <http://www.fao.org/3/a-i4646e.pdf> [accessed on 10 August 2020].

**Fox, t.C. Y guerinot, m.L.** 1998. Molecular biology of cation transport in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49:669-696.

**Fox, t.C.; Shaff, j.E.; Grusak, m.A.; Norvell, w.A.; Chen, y.; Chaney, r.L. Y kochian, I.V.** 1996. Direct measurement of <sup>59</sup>Fe-labeled Fe<sup>2+</sup> influx in roots of pea using a chelator buffer system to control free Fe<sup>2+</sup> in solution. *Plant Physiol.* 111:93-100.

**Gonzalez-vallejo, e.B.; Susin, s.; Abadía, a; abadía, j.** 1998. Changes in sugar beet leaf plasma membrane Fe(III)-chelate reductase activities mediated by deficiency, assay buffer composition, anaerobiosis and the presence of flavins. *Protoplasma.* 205:163-168.

**Guerinot m I y yi y.** 1994. Iron: nutritious, noxious and not readily available. *Plant Physiol.* 104(3):815-820.

**Guggenheim, K.Y.** Chlorosis: The Rise and Disappearance of a Nutritional Disease. *J. Nutr.* 1995, 125, 1822-1825.]]

**Hansen n c, jolley v d, berg w a, hedges m e y krenzer e g.** 1996. Phytosiderophore release related to susceptibility of wheat to iron deficiency. *Crop Sci.* 36(6):1473-1476.

**Hell r y stephan u w.** 2003. Iron uptake,

trafficking and homeostasis in plants. *Planta* 216(4):541-551.

**Herbik a, giritch a, horstmann c, becker r, balzer h j, bäumlein h y stephan u w.** 1996. Iron and copper nutrition-dependent changes in protein expression in a tomato wild type and the nicotianamine-free mutant chloronerva. *Plant physiol.* 111(2):533-540.

**Holden m j, luster d g, chaney r l, buckhout t j y robinson c.** 1991. Fe<sup>3+</sup> - chelate reductase activity of plasma membrane isolated from tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) Roots- comparison of enzymes from fedeficient and fe-sufficient roots. *Plant physiol.* 97(2):537-544.

**Hopkins, b. G.; Jolley, v. D.; Brown, j. C.** 1992. Plant utilization of iron solubilized by oat phytosiderofore. *J. Plant nutr.* 15:1599-1612.

**Hsu, w.; Miller, g. W.;** 1968. Iron in relation to acotinase hydratase activity in glycine max. *Merr. Biochim. Biophys. Acta* 15: 711-713.

**Hughes, d.F., V.D. Jolley and j.C. Brown.** 1992. Roles for potassium in the iron-stress response mechanisms of strategy i and strategy ii plants. *J. Plant nutr.* 15: 1821-1839.

**Jolley, v.D.; Brown, j.C.; Blaylock, m.; Camp, s.** 1988. A role for potassium in the use of iron in plants. *J. Plant nutr.* 11: 1159-1175.

**Jones d I.** 1998. Organic acids in the rhizosphere-a critical review. *Plant soil* 205(1):25-44.

**Kawai s y alam s.** 2005. Iron stress response and composition of xylem sap of strategy ii plants. Pp.: 289-309. En: iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms: iron in plants and microbes. Barton, I. L. And abadía, j. Eds.; Kluwer academic publishers: dordrecht, the netherlands.

**Kawai, s.; Kamei, s.; Matsuda, y.; Ando, r.; Kond, s.; Ashizawa, a.; Alam, s.** 2001. Concentrations of iron and phytosiderophores in xylem sap of iron-deficient barley plants. *Soil sci. Plant nutr.* 47 (2): 265-272.

**Kawai s, takagi s i y sato y.** 1988. Mugineic

acid-family phytosiderophores in rootsecretions of barley, corn and shorgum varieties. *J. Plant nutr.* 11(6-11):633-642.

**Klem-Marciniak, E.; Huculak-Maczka, M.; Marecka, K.; Hoffmann, K.; Hoffmann, J.** Chemical Stability of the Fertilizer Chelates Fe-EDDHA and Fe-EDDHA over Time. *Molecules* 2021, 26, 1933. <https://doi.org/10.3390/molecules26071933>.

**Kobayashi, t.; suzuki, m.; Inoue, h.; Itai, r. N.; Takahashi, m.; Nakanishi, h.; Mori, s.; Nishizawa, n. K.** 2005. Expression of iron-acquisition-related genes in iron-deficient rice is co-ordinately induced by partially conserved iron-deficiency-resposive elements. *J. Exp. Bot.* 56: 1305-1316.

**Kobayashi,t.; Nishizawa, n. K.; Mori, s.** 2006. Molecular analysis of iron-deficient graminaceous plants. In iron nutrition in plants and rhizospheric microorganism. (L. L. Barton; j. Abadía [eds]). Springer. Isbn-101-4020-4742-8 (hb). Netherlands. 395-435.

**Laulhere j p.; Briat j f.** 1993. Iron release and uptake by plant ferritin : effects on ph, reduction and chelation. *Biochem. J.* 290: 693-699.

**Lindsay, w.L.** 1979. Chemical equilibria in soils. Ed. John and sons n.Y. Isbn 0-471-02704-9.

**Lindsay, w.L.** 1991. Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant soil* 130:27-34.

**Lindsay w l y schwab a p.** 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *J. Plant nutr.* 5(4-7):821-840.

**Lobreaux, s. Briat, j. F.** 1991. Ferritin accumulation and degradation in diferents organs of pea (*pisum sativum*) during development. *Biochem. J.* 274: 601-606.

**López millan, a, f.; morales, f.; Abadía, a.; Abadía a.; Abadía, j.** 2000<sup>a</sup>. Effects of iron deficiency on the composition of the leaf apoplastic fluid and xylem sap in sugar beet. Implications for iron and carbon transport. *Plant physiol.* 124: 873-884.

**López-millán a f.** 2000. Adquisición y

transporte de hierro en plantas. Tesis doctoral. Pp.: 236. Estación experimental de aula dei. Csic. Zaragoza, españa.

**Lucena j j.** 2000A. Effects of bicarbonate, nitrate and other environmental factors on iron chlorosis. A review. *J. Plant nutr.* 23(11-12):1591-1606.

**Lucena j j.** 2003. Fe chelates for remediation of fe chlorosis in strategy i plants. *J. Plant nutr.* 26(10-11):1969-1984.

**Lucena j j.** 2005. Iron fertilizers in correcting iron deficiencias in plants. Pp.: 105-130. En: iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms: iron in plants and microbes. Barton, I. L. And abadía, j. Eds.; Kluwer academic publishers: dordrecht, the netherlands.

**Marschner, h., Röemheld, v., Kissel, m.** 1986. Diferent strategies in higher plants in movilization and uptake of iron. *J. Plant nutrition* 9 695-713.

**Marschner, h.** 1995. Mineral nutrition in higher plants. Academic press. Isbn 012-473542-8.

**Mengel, k.; Bübl, w.** 1983. Verteilung von eisen in blättern von weinreben mit hco<sub>3</sub>-induzierter chorose. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, 145: 261-267.

**Mengel, k. Kirkby, a.E.** 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publishers. Isbn 0-7923-7150-k (hb. Isbn 1-4020-008-1[pb]).

**Mengel, k. Malissiovas, n.** 1982. Light dependent proton excretion by roots of entire vine plants (*vitis vinifera* l.) *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, 145: 261-267.

**Miller, r. W.; Pushnik, j. C.; Welkie, g. W.** 1984. Iron chlorosis, a world wide problem, the relation of chlorophyll biosynthesis to iron. *J. Plant nutr.* 7:1-22.

**Mori, s.; Nishizawa, n.; Hagashi, h.; Chimo, m.; Yoshimura, e.; Ishihara, j.** 1991. Why are young rice plants highly susceptible to iron deficiency?. *Plant soil.* 130: 143-156.

**Moog p r y brüggemann w.** 1994. Iron reductase systems on the plant

plasmamembrane- a review. *Plant soil* 165(2):241-260.

**Murad, e.; Fisher, w r.** 1988. The geobiochemical cycle of iron. In iron in soils and clay minerals. (J. W. Stucki, et al. Eds). D. Reidel publishing ccompany: 1-18 pp.  
**Nagarathana, k. C.; Shetty, a.; Bhar, s. G.; Shetty h. S.** 1992. The possible involment og lipoxxygenase in downy mildew resistance in peral miller. *J. Exp. Bot.* 43:1283-1287.

**Nikolic, m.** 1998. The role of the redox systems in uptake and traslocation og iron by higher plants. *Lugoslav. Physiol pharmacol. Acta* 34 (2): 479-489.

**Nishizawa, n., Mori, s.** 1987. The particular vesicle appearing in the barley root cells and its relation to muginei acid secretion. *J. Plant nutr.* 10:1013.1020.

**Pestana m, vareennes a y aráujo faria e.** 2003. Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees: a review. *Food, agriculture & enviroment* 1(1):46-51.

**Pich a, hillmer s, manteuffel r, scholz g.** 1997. First immunohistochemical localization of the endogenous Fe<sup>2+</sup> -chelator nicotianamine. *J. Exp. Bot.* 48(308):759-767.

**Rabotti, g. Y zocchi, g.** 1994. Plasma membrane-bound h<sup>+</sup> -atpase and reductase activities in fe-deficient cucumber roots. *Physiol. Plant.* 90:779-785.

**Rombolà, a. D.; Brüggemann, w.; López-millan, a. F.; Tagliavini, m.; Abadía, j.; Marangoni, b.; Moog, p. R.** 2000. Iron source affects iron reduction and re-greening of kiwifruit [actinicia deliciosa] leale. *J. Of plant nutrition*, 23:1751-1765.

**Rombolà, a. D.; Brüggemann, w.; López-millan, a. F.; Tagliavini, m.; Abadía, j.; Marangoni, b.; Moog, p. R.** 2002. Biochemical responses to iron deficiency in kiwifruit [actinidia deliciosa]. *Tree physiology.* 22: 869-875.

**Römheld, v.** 1987. Existence of two difference strategies for the acquisition of iron in higher plants. Pp 353-374. In iron transport in microbes, plant and animals. G. Winkelmann, d. Van der helm, j. B. Neiland. Vch-verlag. Weinheim.

**Römheld v y marschner h.** 1986. Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. Pp.: 155-204. En: advance in plant nutrition. Vol.2. Tinker b. Y laüchli a. Eds; praeger scientific, new york.

**Römheld, v., Marschner, h.** 1990. Genotypical differences among graminaceous species in release of phytosiderophores and uptake of iron phytosiderophores. *Plant soil.* 123:147-153.

**Römheld, v. Y marschner, h.** 1991. Functions of micronutrients in plants. En: micronutrients in agriculture, 2<sup>o</sup> ed. J.J. Mordvedt, f. R. Cox, I. M. Shuman and r. M. Welch, [eds.]. Sssa book series, n<sup>o</sup>4, Madison, wi. Usa. Pp:297-328.

**Rout and Sahoo,** *Reviews in Agricultural Science*, 3:1-24, 2015. doi:10.7831/ras.3.1

**Sánchez-andreu j, jordá j y juarez m.** 1991. Reactions of feedta and feeddha applied to calcareous soils. Pp.: 57-62. En: iron nutrition and interactions in plants. Chen, y. And hadar, y; Kluwer academic publishers: dordrecht, the netherlands.

**Schlee, d.; Reinbothe, d.; fritsche, w.** 1968. Der einfluss von eisen auf den purinstoffwechsel und die rivoflavinbildung von canadida guilliermondii [cast]. *Lang et g. Allg. Mikrobiol* 8: 127-138.

**Schwertmann, u.;** 1991. Solubility and dissolution of iron oxides. In iron nutrition and interactions inplants. (Y. Chen; y. Hadar). Kluwer academic publishers isbn 0-7923-1095-0: 3-27.

**Schwertmann, u.; Taylor, r. M.** 1989. Iron oxides. In mineral in soil environments 2nd edition) (j. B. Dixon; s. B. Weed eds). Soil science society of america. 677 South segoe road madison. Wl 53711. Usa. Ssa book series. No.1: 379-438.

**Shi y, byrne d h, reed d w m y loeppert r h.** 1993. Iron chlorosis development and growth response of peach rootstocks to bicarbonate. *J. Plant nutr.* 16(6):1039-1046.

**Siebner-freibach h, hadar y y chen y.** 2004. Interaction of iron chelates with clay minerals. *Soil sci. Soc. Am. J.* 68(2):470-480.

**Smith, b. N.** 1984. Iron in higher plants: storage and metabolic rate. *J. Plant nutr.* 7: 729-766.

**Susin, s.; Abadía, a.; Gonzales-reyes, j. A.; Lucena, j. J.; Abadía, j.** 1996. The ph requirement for in vivo activity of the iron-deficiencyinduced "turbo" ferric chelate reductase. A comparison of the iron-dificiency-induced iron reductase activities of intact plants and isolated plasma membrane fractions in sugar beet. *Plant physiology.* 110: 111-123.

**Somers, i. l., Gilbert, s. G., And shive, j. W.** 1942. The iron-manganese ratio in relation to the respiratory CO<sub>2</sub> and the deficiency toxicity symptoms in soybeans. *Plant physiol.* 17: 317-320.

**Stephan w y scholz g.** 1993. Nicotinamine: mediator of transport of iron and heavy metals in the phloem?. *Physiol. Plant.* 88:522-529.

**Stephan, u. W.;** 2002. Intra- andintercellular iron trafficking and subcellular compartmentation withn roots. *Plant and soil* 241: 522-529.

**Takagi s, nomoto k y takemoto t.** 1984. Physiological aspect of mugineic acid, a possible phytosiderophore of graminaceous plants. *J. Plant nutr.* 7(1-5):469-477.

**Takagi, s.** 1976. Naturally occurring iron-chelating compounds in oat- and rice-root washings. Activity measurement and preliminary characterization. *Soil sci. Plant nutr.* 22:423-433.

**Terry n y abadía j.** 1986. Function of iron in chloroplasts. *J. Plant nutr.* 9(3-7):609-646.

**Theil, e. C.** 1987. Ferritin: structure, gene regulation, and cellular function in animals, plants and microorganisms. *Annu. Rev. Biochem.* 56: 289-315.

**Tiffin, l. O.** 1970. Translocation of iron citrate and phosphorus in xylem exudates of soybean. *Plant physiol.* 45:280-283.

**Toulon v, sentenac h, thibaud j b, davidian j c, moulineau c y grignon c.** 1992. Role of









Follow us on



Valagro France, à Ecopôle des Séolanes  
210 Avenue de la Cigalière  
84250 Le Thor (France)  
Tél. +33 (0)4 90 21 44 44  
info.france@valagro.com



Rejoignez la communauté numérique de Valagro.  
Découvrez la toute nouvelle application e-Hub.  
Rejoignez-nous ici !

**Win the Global challenge together.**