

La fertilisation

foliaire

REVUE DE LA LITTÉRATURE



édition août 2024

Pierre Migner,
agronome (retraité), M.Sc., MBA

Agro
100[®]
cultiver l'innovation



TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	3
2	LES CARACTÉRISTIQUES DE LA PLANTE	5
	a. Dimension de la molécule	5
	b. Charge électrique de la molécule	5
	c. Stade de croissance de la plante	6
	d. État nutritionnel de la plante	6
3	LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	7
	a. Luminosité	7
	b. Température	7
	c. Point de déliquescence (PDD)	8
4	LES PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DES ENGRAIS/BIOSTIMULANTS	9
	a. Solubilité des nutriments	9
	b. La dimension des molécules	9
	c. La charge électrique des nutriments	9
5	LES CONDITIONS D'APPLICATION	12
	a. Les adjuvants	12
	b. La pulvérisation	13
6	LES CARACTÉRISTIQUES DES AGROLIQUIDES D'AGRO-100	14
	a. La technologie Oligo Prime®	14
	b. Résultats des essais	16
7	CONCLUSION	18
8	BIBLIOGRAPHIE	19



INTRODUCTION

1

La **fertilisation foliaire** est un outil important pour les agriculteurs et elle n'a pas pour but de remplacer la fertilisation granulaire de base; elle se veut plutôt complémentaire à celle-ci^{1,2,3,4*}. De nombreux résultats de recherche démontrent que la fertilisation foliaire a un effet significativement positif sur la croissance, sur le développement et sur le rendement des cultures^{5,6,7,8,9}.

La fertilisation foliaire permet d'obtenir des réponses rapides de la culture à des coûts avantageux spécialement lorsque des conditions adverses sont présentes. La fertilisation foliaire est efficace et elle permet d'ajouter de plus petites quantités de nutriments à des moments précis pendant la croissance des plantes. Cette technique est utilisée dans certains contextes bien définis et elle vise des buts bien précis:

- ① corriger ou prévenir l'apparition de carences minérales lorsque les conditions du sol limitent la disponibilité des nutriments (sols alcalins, acides, mal pourvus en un élément minéral quelconque, déséquilibrés, etc.)¹⁰;
- ② corriger ou prévenir l'apparition de carences minérales lorsque des situations climatiques inhabituelles (sols mal drainés et inondés, gel, grêle, froid, sécheresse) empêchent une alimentation minérale adéquate pouvant s'échelonner sur de courtes à longues périodes¹¹;
- ③ amplifier certaines caractéristiques physiologiques (gabarit de la fleur et du fruit, qualité du pollen de la fleur, poids du fruit, coloration de l'épiderme du fruit, fermeté du fruit, qualité du grain, pourcentage de protéines, etc.)¹²;
- ④ provoquer le déclenchement d'un stade phénologique qui tarde à se réaliser (floraison, véraison, maturation, etc.) ou à l'inverse retarder l'entrée trop hâtive dans le processus de maturation (empêcher le feuillage de la pomme de terre de « tomber » trop vite, finition du bulbe de l'oignon, etc.)¹³;

* Ces chiffres correspondent à la liste des ouvrages numérotés apparaissant dans la bibliographie.

- ① soutenir la plante dans sa croissance par la pulvérisation régulière d'un ou de certains engrais spécifiquement choisis en fonction du stade phénologique en cours (azote pour la production de feuillage et pour le contenu en protéines; bore et phosphore pour la floraison; calcium et potassium pour la fructification, etc.) et de l'exigence minérale propre à l'espèce cultivée (bore et molybdène pour les crucifères; manganèse pour les légumineuses; magnésium pour les solanacées et cucurbitacées; bore et calcium pour les rosacées, etc.).

Pour maximiser le retour sur l'investissement de ces applications, **il est essentiel de connaître les facteurs régissant l'efficacité de la fertilisation foliaire**^{14,15}. Plusieurs facteurs peuvent influencer l'efficacité d'une application foliaire. On peut les regrouper en trois grandes catégories.

● Les caractéristiques de la plante sur laquelle l'application foliaire est effectuée

La forme de la feuille, la composition de la cuticule de la feuille, la présence de poils, le stade de croissance de la plante, la mobilité du nutriment dans la plante, la présence de stress abiotiques peuvent influencer l'absorption des nutriments et biostimulants¹⁰.

● Les conditions environnementales au moment de l'application

L'humidité relative, l'approvisionnement en eau, la lumière et la température sont autant de facteurs qui influencent l'absorption foliaire des molécules¹⁶.

● Les propriétés physicochimiques des engrais/biostimulants

La solubilité, la dimension de la molécule, la charge électrique, le pH, la tension de surface, la rétention, le point de déliquescence sont autant de facteurs qui influencent la capacité d'absorption de la molécule par la feuille¹⁷.

Ces facteurs interagissent entre eux et influenceront l'absorption et la mobilité des nutriments dans les plantes et ultimement la réponse de la culture aux applications de fertilisants et biostimulants foliaires.





LES CARACTÉRISTIQUES DE LA PLANTE

2

L'épiderme des feuilles est protégé et recouvert d'une cuticule qui protège les plantes contre les stress abiotiques et biotiques, et qui est **essentielle pour minimiser les pertes d'eau par évapotranspiration**. Cette cuticule est constituée de lipides, d'une matrice de cutine et de cire, et d'hydrates de carbone. La composition exacte de la cutine varie d'une espèce à l'autre et elle sera influencée par l'âge de la plante et les conditions climatiques. **La cutine est hydrophobe (qui repousse l'eau) et chargée négativement**. Cependant, l'épiderme des feuilles est couvert de stomates, de trichomes et de pores hydrophiles (qui attirent l'eau)¹⁰ et qui permettent aux nutriments d'entrer dans le feuillage.

Les nutriments et biostimulants sont absorbés à travers l'épiderme de la feuille par diffusion ; les nutriments sur le feuillage (zones de haute concentration) traversent l'épiderme de la feuille pour aller vers l'intérieur de la feuille (zones de faible concentration).

a. Dimension de la molécule

Les nutriments et biostimulants peuvent pénétrer dans la feuille en passant par les pores hydrophiles et les stomates. Le nombre de pores dans la surface foliaire est évalué à plus de 10 000 000 000/cm². On évalue le nombre de stomates à approximativement 35 000/cm² de surface foliaire. Ces ouvertures laissent les molécules de **petite dimension** (moins de 1 nanomètre ou 1/10 000 000 de cm) pénétrer dans la feuille¹⁸. Les trichomes sont des excroissances sur les cellules de l'épiderme des feuilles des plantes. Ils protègent les plantes contre les stress abiotiques et biotiques et, parce qu'ils sont moins hydrophobes que la cuticule, absorbent plus facilement l'eau et les nutriments en solution¹⁹.

b. Charge électrique de la molécule

La cuticule étant chargée négativement, la charge électrique du nutriment peut avoir une influence sur la rapidité à laquelle ces nutriments et biostimulants pourront possiblement pénétrer dans la feuille. **Les molécules chargées positivement sont retenues à la surface de la feuille et s'accumulent**, limitant l'absorption des nutriments et pouvant ainsi causer des brûlures sur les feuilles. Les molécules non chargées

électriquement (charge neutre) pourront être absorbés plus facilement que les molécules chargées positivement²⁰. C'est pour cette raison que des chélates sont utilisés dans les formulations pour neutraliser les molécules (voir section 4).

c. Stade de croissance de la plante

L'âge des feuilles a des effets importants sur la composition et la quantité de cire produite. Parce qu'une feuille âgée a atteint son niveau optimal de maturité et a ainsi complètement développé ses couches de l'épiderme, il est normal de conclure qu'une feuille âgée possède un pouvoir d'absorption en éléments minéraux moindre que celui d'une feuille plus jeune²¹.

Cependant, des travaux menés par Mengel en 2002 ont démontré que des feuilles plus âgées peuvent avoir une meilleure absorption des éléments minéraux que des feuilles plus jeunes. Selon cette expérience, les feuilles plus âgées possèdent une surface foliaire plus grande, ce qui permet d'optimiser la surface d'absorption des minéraux. De plus, les feuilles plus matures peuvent être partiellement endommagées et ainsi contenir des interstices laissant passer, par diffusion, les éléments solubles³.

Par contre, pour des feuilles ayant le même âge physiologique, selon le moment de la saison, il y a une réponse différente concernant l'absorption des fertilisants foliaires. Généralement, il est admis que le taux de pénétration cuticulaire des nutriments est plus rapide chez les jeunes feuilles²², tandis que la translocation de ces éléments est plus efficace chez les feuilles plus âgées²³. Il est important de noter que les nutriments mobiles pourront être transloqués vers les tissus plus jeunes seulement quand les feuilles plus âgées auront fini de se développer.



d. État nutritionnel de la plante

La proportion des nutriments passant à travers de l'épiderme de la feuille est aussi fonction de l'état nutritionnel de la plante. Ainsi, Marschner a démontré en 1995, qu'une plante carencée pour un nutriment absorbait plus de cet élément qu'une plante témoin non carencée²⁴, comme le démontre l'exemple présenté dans le tableau 1.

Tableau 1.

Absorption foliaire et translocation du phosphore ³²P par des plants d'orge ($\mu\text{m}^{32}\text{P/g}$ de matière sèche)

	Plante non carencée en ³² P	Plante carencée en ³² P
Absorption foliaire	5,29 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 0,54$	9,92 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 2,17$
Translocation dans la plante	2,00 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 0,25$	5,96 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 1,08$
Translocation aux racines	0,63 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 0,04$	4,38 $\mu\text{m}^{32}\text{P} \pm 0,42$



LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

3

T

out facteur climatique agissant sur la perméabilité ou l'épaisseur de la cuticule, la dimension et le nombre des feuilles aura une influence sur l'absorption des nutriments par le feuillage.

a. Luminosité

La lumière augmente l'épaisseur de la cuticule et augmente l'activité des stomates. Il a été démontré que l'épaisseur de la cutine et la présence de cire à la surface de l'épiderme de la feuille sont plus élevées dans des conditions de fortes intensités lumineuses chez l'eucalyptus²⁵, le chou²⁶ et le chou de Bruxelles²⁷.

Il en va de même de l'influence de la lumière sur le degré d'ouverture des stomates²⁸. Les stomates jouent un rôle important dans la pénétration foliaire des nutriments ; le taux de pénétration des éléments minéraux dans les stomates est plus élevé en présence qu'en absence de lumière²⁹.

La pré-illumination des feuilles d'une plante de type ornemental nommée « herbe de la Saint-Jean » (*Sedum telephium*), a augmenté le taux de pénétration par un facteur de 1,5 à 36 comparé à celui des feuilles gardées à la noirceur²⁹.

b. Température

Les températures plus élevées favorisent une croissance plus grande de la surface foliaire et de l'épaisseur de la cire. Une expérience menée par Alexander en 1987 a démontré que les températures chaudes augmentent l'expansion de la surface foliaire des pruniers et la production de cire à la surface des feuilles. Cependant, l'expansion de la surface foliaire due aux hautes températures est plus rapide que la production de cire par unité de surface. **On en conclut donc que l'expansion foliaire résultant des températures élevées a un effet positif sur l'absorption foliaire**³⁴.

L'effet de la température sur l'absorption foliaire et la translocation des éléments minéraux est un autre facteur d'influence. Par exemple, l'absorption foliaire et la translocation du potassium dans la plante dépendent largement de la température. La translocation s'effectue très lentement à 4 °C, et augmente rapidement jusqu'à 20 °C. Par contre, une diminution de la rapidité de la translocation est constatée entre 20 et 30 °C²³.

c. Point de déliquescence (PDD)

Le point de déliquescence se définit comme le taux d'humidité où un solide se dissout en absorbant l'humidité de l'air. Lorsque l'humidité au-dessus de la cuticule dépasse le PDD du nutriment, l'absorption peut avoir lieu, tandis qu'une humidité en-dessous du PDD aura comme conséquence la formation de résidus de sels solides et l'arrêt de l'absorption cuticulaire³¹. Par conséquent, **les nutriments utilisés pour la fertilisation foliaire devraient avoir une valeur de PDD la plus faible possible** (voir tableau 2).

Tableau 2.

Valeurs de points de déliquescence de différentes matières premières (20 °C)^{32,33}

Sels	Point de déliquescence
Hydroxyde de potassium (KOH)	18 %
Acétate de potassium	22 %
Chlorure de magnésium	34 %
Carbonate de potassium	43 %
Nitrate de calcium	53 %
Nitrate de magnésium	60 %
Acétate de magnésium	72 %
Nitrate de sodium	80 %
Sulfate d'ammoniaque	82 %
Chlorure de potassium	89 %
Acétate de calcium	92 %
Nitrate de potassium	96 %
Sulfate de potassium	99 %



Le taux d'humidité influence également l'absorption foliaire des nutriments en augmentant la perméabilité de la cuticule et donc l'absorption du nutriment foliaire²². Une forte rosée équivaut à une petite pluie et provoque le lessivage. Cependant, une faible rosée est un atout, car elle augmente la perméabilité de la cuticule.

Les engrais foliaires **doivent être appliqués le matin, le soir ou par temps nuageux**, lorsqu'il ne vente pas ou peu et que les températures ne sont pas trop élevées. L'eau appliquée doit sécher le plus lentement possible pour que les nutriments aient le temps de passer à travers la cuticule. **Le jour, par temps ensoleillé ou venteux, les conditions sont desséchantes et le pourcentage d'humidité au-dessus de la cuticule descend rapidement**; les nutriments peuvent alors précipiter sur le feuillage et ne plus être disponibles pour l'absorption. En situation de conditions desséchantes, les stomates sont habituellement fermés afin de permettre à la feuille de se protéger contre la déshydratation³⁰. L'absorption des nutriments par les stomates est alors impossible. La pulvérisation d'un engrais foliaire devrait donc s'effectuer dans un contexte où l'humidité de l'air est supérieure à 60 %, la température maximale à 25 °C et un vent d'au plus 10 km/h^{34,18}.



LES PROPRIÉTÉS PHYSICOCIMIQUES DES ENGRAIS/BIOSTIMULANTS

4

a. Solubilité des nutriments

Les plantes absorbent les nutriments ou biostimulants par les racines ou les feuilles, s'ils sont **solubles dans l'eau**³⁵. Lorsqu'appliqués au sol, les engrais semi-solubles ou insolubles seront éventuellement transformés par des actions biologiques ou chimiques et deviendront disponibles pour les racines des plantes dans la solution du sol. Lorsqu'appliqués sur le feuillage, les engrais semi-solubles ou insolubles dans l'eau **ne sont pas absorbés rapidement** par les feuilles et s'accumulent sur leur surface, pouvant causer des brûlures.

b. Dimension des molécules

Plusieurs études ont démontré que **le taux d'absorption des nutriments diminue significativement avec l'augmentation de leur poids moléculaire**. Les sels inorganiques sont à privilégier, car ils ont généralement un poids moléculaire inférieur à celui des nutriments sous forme organique^{15,36}. Les pores par lesquelles les nutriments sont absorbés, ont généralement un diamètre inférieur à 1 nanomètre (nm) (ou à 1/10 000 000 de centimètre). Les nutriments sont

habituellement des molécules de faible poids moléculaire ayant un diamètre se situant entre 0,34 nm et 0,44 nm. Les acides aminés ont un diamètre entre 0,34 nm et 1,12 nm. Les molécules plus grandes comme l'EDTA (1,23 nm) ne peuvent être absorbées par les pores du feuillage²⁰.

Cependant, certaines exceptions s'appliquent. Bien que l'urée soit un sel organique, son taux d'absorption s'est révélé supérieur dans la plupart des études par rapport aux autres sources d'azote³⁷. Il faut cependant se rappeler que l'urée est une molécule de très faible dimension (0,26 nm).

c. Charge électrique des nutriments

Les nutriments ont habituellement une charge positive. Tel que mentionné plus haut, la cuticule et les parois cellulaires ont une charge négative. **Les nutriments sont donc immobilisés sur la cuticule ou sur les parois cellulaires des feuilles**, une fois absorbés dans les liquides extracellulaires.

L'efficacité de la fertilisation foliaire dépend, entre autres, de la mobilité des éléments dans la plante. Le phosphore, le potassium et l'azote sont des exemples de minéraux avec une mobilité élevée. Cette mobilité permet de distribuer rapidement les nutriments à travers l'ensemble de la plante. Pour leur part,

le bore, le calcium, le soufre, le zinc, le manganèse et le fer sont des éléments avec une faible mobilité dans le phloème. À cet effet, plusieurs études démontrent que la forme chélatée des nutriments, en plus de favoriser leur absorption foliaire, augmente leur mobilité dans la plante^{38,39,40,3,41,42}.

La chélation, appelée aussi séquestration ou complexation, est un processus physicochimique au cours duquel est formé un complexe, le chélate, entre un ligand, dit « chélateur » (ou chélatant), et un cation métallique, alors complexé, dit « chélaté ». Les chélates (ligands) sont des molécules inorganiques ou organiques de dimensions variables. Le nombre de liens entre le chélate et le cation, la formation de cycles chélates et la dimension du chélate déterminent la force du lien entre le cation et l'agent chélatant. **Le cation chélaté devient alors « neutre », sans charge positive**⁴³.

Il existe plusieurs types d'agents chélatants et complexants ayant chacun leurs propres caractéristiques et dont les performances sont liées à la nature du chélate, à la nature de

l'élément minéral complexé et à la nature du tissu végétal à franchir (ici l'épiderme de la feuille) (voir figure 1). Contrairement aux adjuvants, lorsque présents dans les engrais foliaires, les chélates sont ajoutés par le fabricant⁴³.

La mesure de l'efficacité d'un agent chélatant/complexant est déterminée par sa capacité à maintenir en solution les métaux chélatés. Cette capacité est variable et dépend du pH de la solution et du métal qui doit être chélaté.

La stabilité et la force des liens des agents chélatants est décrite par l'indice de dissociation, exprimé par la valeur $\log K$. Plus la valeur du $\log K$ est élevée, plus l'agent chélatant/complexant est puissant^{43,44,45}. Il faut cependant noter que la puissance de l'agent chélatant doit correspondre à son utilisation. Ainsi, une application de métaux au sol nécessite une puissance plus élevée qu'une application foliaire. La puissance de l'agent chélatant doit être modérée dans le cas d'une application foliaire afin de permettre la libération de l'ion métallique une fois la pénétration foliaire effectuée (voir tableau 3).

Figure 1. Forme de sels, agents chélatants et complexants

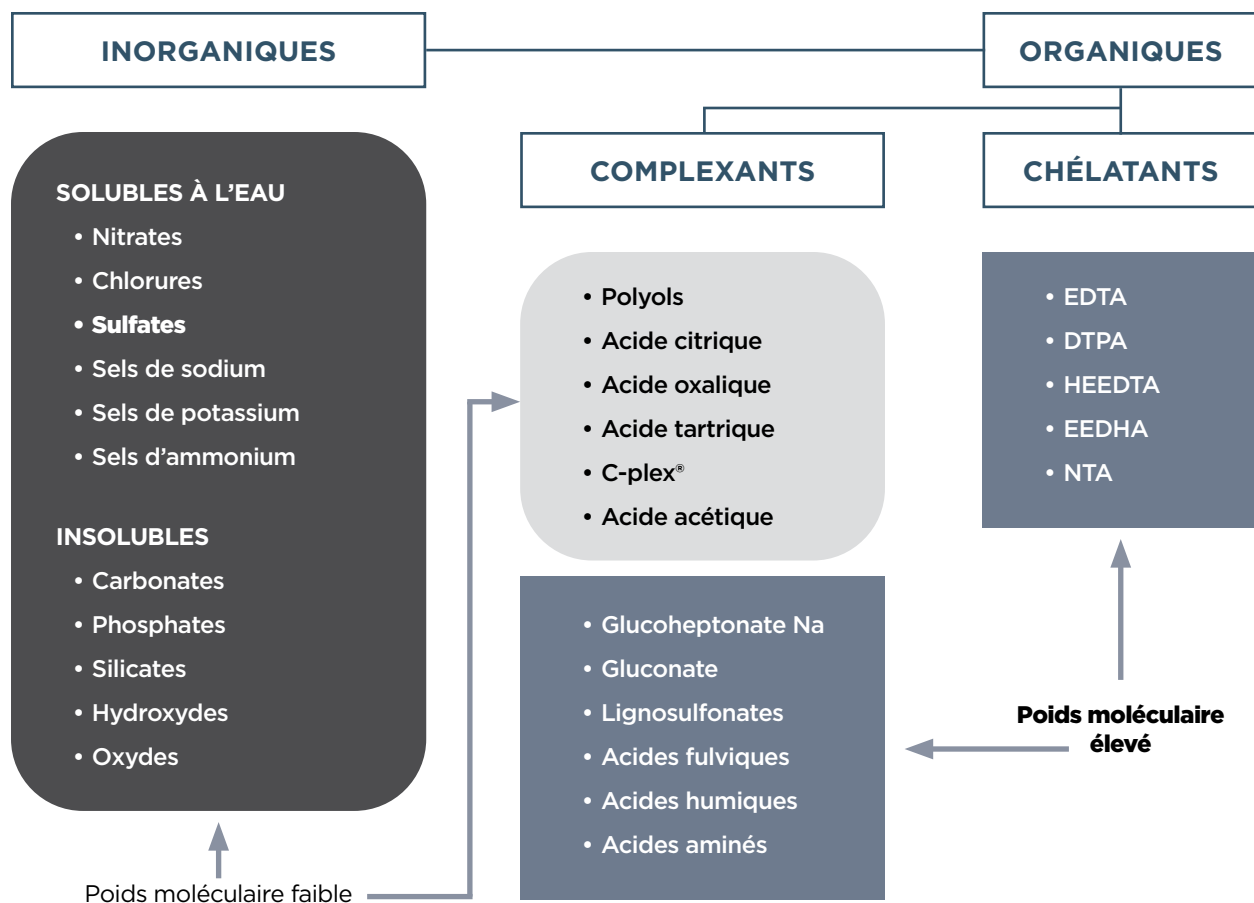
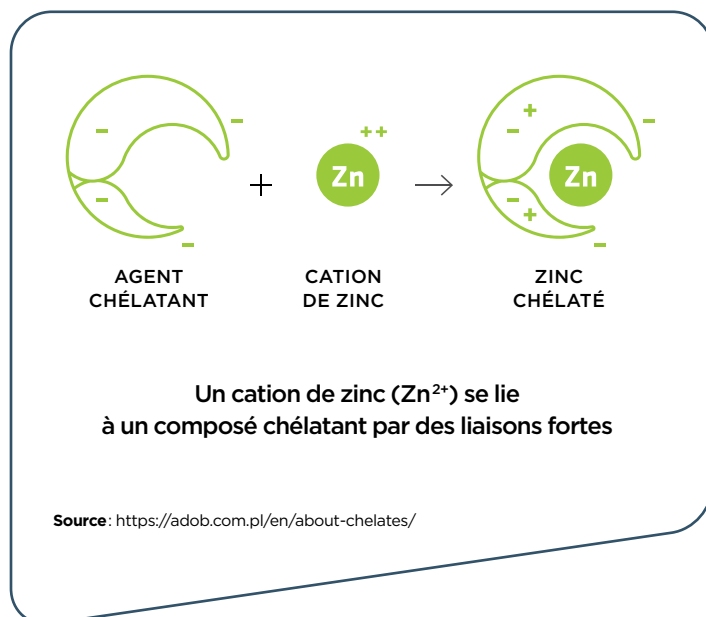


Tableau 3. Valeur des indices de dissociation pour différents agents chélatants^{44,43,45}

Valeur du log K de certains agents chélatants/complexants							
Agent chélatant	Fe/Fe ³⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
EDTA	25,0	14,3	14,9	18,7	13,8	8,8	11,0
EDDHA	33,9	14,3	16,8	23,9	—	8,0	7,2
HEEDTA	19,6	12,2	14,5	17,4	10,7	7,0	8,0
DTPA	28,6	—	18,1	21,0	15,1	9,0	16,5
NTA	15,9	—	10,4	12,6	7,4	—	6,4
Acide citrique	3,2	—	4,5	6,1	3,4	2,8	18,0
Acide fulvique	4,8	—	4,9	4,1	5,9	4,2	7,2
Citrate	11,2	4,8	4,9	5,9	3,7	—	4,7
C-plex [*]	3,0	—	3,9	4,8	3,0	2,5	6,0
Gluconate	37,2	1,0	1,7	36,6	—	0,7	1,2
Polyphosphates	4,1	—	7,5	3,5	5,5	3,2	—
Acides aminés	Varie de 2,2 à 8,0 en fonction de l'acide aminé et du cation						
Lignosulfonate	14,0	—	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0

Ainsi, certains chélates se distinguent plus que d'autres. Par exemple, une étude a testé l'effet de la translocation du fer de la feuille aux racines à la suite d'une pulvérisation foliaire de fer chélaté effectuée conjointement avec cinq agents chélatants et dix agents complexants différents. Cette étude a conclu que la translocation racinaire est survenue uniquement dans le cas où le fer fut pulvérisé avec du lignosulfonate⁴². Cependant, concernant le zinc, une étude a démontré que l'utilisation d'agents chélateurs tels l'EDTA et le lignosulfonate, n'augmente pas le pouvoir d'absorption foliaire du Zn chez les plantes^{46,3,47}.

Enfin, des propriétés inattendues ont été associées à la pulvérisation foliaire de lignosulfonate. Le lignosulfonate aurait pour effet de déclencher une activité hormonale (production d'auxine et de gibbérelline) dans le maïs. Cela s'expliquerait par l'action des composés phénoliques contenus dans l'agent complexant⁴⁸.





LES CONDITIONS D'APPLICATION

5

a. Les adjuvants

On entend par « adjuvant » toute substance qu'on ajoute à la bouillie pour modifier et pour améliorer l'efficacité des produits agrochimiques. On utilise des adjuvants pour améliorer la qualité de la bouillie, sa stabilité, la qualité de la pulvérisation et le devenir du produit phytosanitaire quand il a atteint la cible.

Sur les plantes, les adjuvants agissent comme :

- ⊙ **Adhésifs/anti-rebond.** L'utilisation de certains adjuvants réduit le rebond des gouttelettes pulvérisées sur la surface des feuilles, ce qui permet une meilleure couverture par la bouillie et, de ce fait, une meilleure pénétration foliaire⁴⁹. Ces produits « accrochent » les gouttelettes sur le point d'impact par effet anti-rebond. Les adhésifs fixent la matière active sur les feuilles contre le lessivage et la volatilisation ;
- ⊙ **Surfactant/agent mouillant.** Les surfactants (*surface active agents*) forment la plus grande catégorie d'adjuvants. L'utilisation de surfactants, notamment d'agents tensio-actifs, peut permettre d'améliorer la mouillabilité sur les feuilles **en diminuant la tension superficielle de l'eau**. Cette diminution de la tension superficielle entre la solution et la surface foliaire permet ainsi de couvrir une plus grande surface de contact et d'échange³⁰ et permet d'augmenter la pénétration par voies stomatales et cuticulaires⁵⁰. La fonction d'un agent mouillant est d'augmenter la surface d'échange grâce à sa partie lipophile et ainsi d'associer des molécules hydrophobes et hydrophiles. Le ratio hydrophile/lipophile peut permettre de déterminer l'efficacité d'un surfactant. Des valeurs élevées du ratio hydrophile/lipophile indiquent habituellement qu'un surfactant peut améliorer l'absorption foliaire des nutriments²¹ ;
- ⊙ **Humectant/protecteur.** Ces produits maintiennent une humidité prolongée sur la surface foliaire (apte à récupérer les molécules d'eau de l'air). Les sels absorbent l'humidité de l'air et luttent ainsi contre la dessiccation ;
- ⊙ **Pénétrant.** Ces produits améliorent la pénétration des matières actives à travers la cuticule. Par exemple, les huiles favorisent la pénétration des matières actives en « cassant » la barrière des couches de cires cuticulaires de la plante.



Il n'y a pas d'adjuvant universel ; il est donc essentiel de connaître chacune de leurs fonctionnalités afin de les utiliser à bon escient.

Les adjuvants, sauf l'urée, sont plutôt utilisés en combinaison avec des produits agrochimiques. Il est admis que la présence d'urée dans la solution fertilisante facilite la pénétration des autres nutriments dans les feuilles. La cuticule est de 10 à 20 fois plus perméable à l'urée qu'aux ions inorganiques³⁷. Par ailleurs, l'ajout d'urée dans la solution fertilisante augmente l'efficacité des applications foliaires contenant du P, Mn, S, Mg et du Fe chez différentes espèces de végétaux^{51,52,53}. Cependant, l'urée doit être exempte de biuret, un produit obtenu par condensation de deux molécules d'urée et par l'élimination d'une molécule d'ammoniac ayant des effets phytotoxiques et pouvant être intégré au fertilisant lors de sa synthèse.

b. La pulvérisation

L'efficacité de la pulvérisation est liée à la meilleure répartition possible des molécules de nutriments sur la feuille. L'efficacité dépend donc du nombre de points d'impact et du diamètre moyen des gouttelettes produites.

Les buses constituent un des éléments clé de la pulvérisation. Leur rôle est de diviser la bouillie sous pression en une multitude de gouttelettes. Le brouillard de gouttes aura certaines caractéristiques (diamètre moyen, vitesse et

direction des gouttes) dont dépendront l'efficacité du traitement, l'importance de la dérive, la volatilisation ainsi que le ruissellement (pertes). Selon le type de buse, le calibre, l'angle du jet ainsi que la pression de travail varieront.

Les buses anti-dérive (buses à pastille, buses à jet plat à dérive limitée ou buses à induction d'air) produisent des gouttes de pulvérisation de grosse taille (diamètre supérieur à 400 μ). Ces grosses gouttes (>400 μ) sont moins sensibles au déport et à la volatilisation. Cependant, elles présentent plusieurs inconvénients : l'étalement et la réduction du nombre d'impacts/cm², leur comportement au moment de l'impact sur la cible (phénomène de rebond ou d'éclaboussures) ainsi que leur tenue sur la cible (phénomène de ruissellement).

La pénétration de la matière active dépendra de la dilution, de la taille des gouttes et de la durée de séchage qui en découle (dessiccation trop rapide des petites gouttes). La durée de vie de la gouttelette et sa vitesse augmentent avec sa taille.

La pulvérisation d'un engrais foliaire nécessite une couverture qui se résume idéalement à 80 gouttelettes/cm² dont le diamètre varie entre 200 et 300 μ . Le contrôle de la qualité de la pulvérisation s'effectue aisément au moyen d'un papier sensible de couleur jaune qui devient bleu au contact de l'eau.



LES CARACTÉRISTIQUES DES AGROLIQUIDES D'AGRO-100

6

Les technologies utilisées par Agro-100 veulent maximiser l'absorption et la mobilité des nutriments et biostimulants en respectant au maximum les principes décrits dans ce document.

Les matières premières choisies respectent les conditions agronomiques, de solubilité, de dimension de la molécule, de point de déliquescence et de chélation décrites plus haut. Les agroliquides d'Agro-100:

- ① sont des solutions et non des suspensions afin d'assurer une pénétration maximale dans le feuillage;
- ② sont fabriqués avec des agents chélatants de petite dimension afin d'assurer la neutralité des molécules;
- ③ contiennent des technologies de biostimulants qui augmentent la résistance aux stress abiotiques et l'absorption et la mobilité des nutriments.

a. La technologie Oligo Prime®

Les cultures ont la capacité de se défendre contre les dommages causés par les espèces réactives à l'oxygène (ERO) créés lors d'événements de stress abiotiques, **comme les déficiences nutritives**, ou par les ERO générés par les herbicides. Les mécanismes de défense contre les ERO comprennent des composants enzymatiques et non enzymatiques qui servent à équilibrer la production et la désintoxication des ERO.

La technologie Oligo Prime® est conçue pour augmenter l'efficacité des mécanismes de défense naturels présents dans toutes les plantes. Elle s'appuie sur quatre composantes:

- ① les signaux métaboliques;
- ② la technologie C-plex®;
- ③ l'acide fulvique;
- ④ le chitosane.

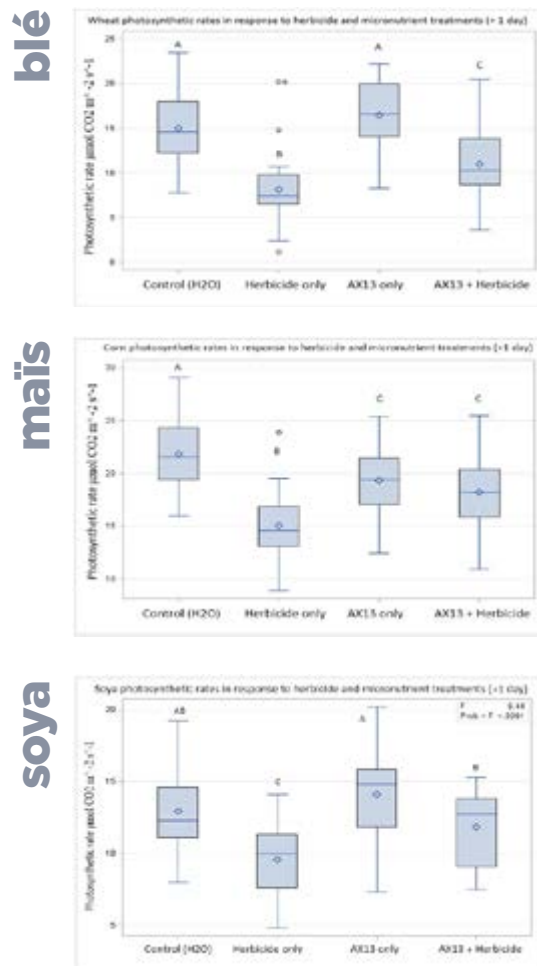
La synergie entre ces quatre technologies permet aux produits contenant la technologie Oligo Prime® de mieux performer et d'offrir des rendements économiques largement supérieurs à 3 pour 1.

1 Le rôle des signaux métaboliques

Il est maintenant clair que la signalisation induite par les phytohormones se produit grâce à la régulation du génome ou avec une augmentation de la production de métabolites secondaires.

Les métabolites secondaires sont synthétisés dans différents compartiments cellulaires et leurs principales fonctions incluent la protection contre les stress biotiques et abiotiques.

Figure 2. Effet des métabolites secondaires sur le taux de photosynthèse



L'ajout de métabolites secondaires à la technologie Oligo Prime® permet de réduire l'impact négatif des stress associés aux déficiences nutritives et aux herbicides sur la photosynthèse. Ainsi, le taux de photosynthèse diminue de 50 % lorsque l'herbicide (blé : bromoxynil/MCPA ; maïs : glyphosate ; soya : glyphosate) est utilisé seul, le taux de photosynthèse diminue de 44 % pour le blé, de 30 % pour le maïs et de 20 % pour le soya lorsque mesuré un jour après l'application. L'ajout de métabolites secondaires aux herbicides permet de réduire la baisse du taux de photosynthèse à 22 % pour le blé, de 16 % pour le maïs et de 10 % pour le soya⁵⁴.

Les métabolites secondaires inclus dans la technologie Oligo Prime® ont aussi un impact sur le génome des plantes et activent la production de 71 protéines et enzymes défensifs qui jouent un rôle dans la réduction de l'impact des ERO.

2 Le rôle du C-plex®

Le C-plex® est une molécule dérivée de l'acide fulvique qui a une taille plus petite et une capacité d'échange cationique plus élevée que l'acide fulvique. Cette taille plus petite est obtenue grâce à un processus de transformation exclusif qui donne des molécules de quelques centaines de daltons. Cette petite taille permet une absorption rapide et facile par la plante et une très grande capacité complexante.

3 Le rôle de l'acide fulvique

Les substances humiques sont divisées en différentes catégories qui comprennent les acides humiques, les acides fulviques et les humines. Les acides humiques sont des molécules plus grosses avec des poids moléculaires allant jusqu'à cent mille daltons, tandis que les acides fulviques ne sont généralement que quelques milliers de daltons. Comme indiqué ci-dessus, l'acide fulvique est considéré comme la fraction organique du sol soluble à la fois dans l'alcali et dans l'acide. Les acides fulviques ont une plus grande acidité totale et une plus grande capacité d'adsorption et d'échange cationique que l'acide humique. Les acides fulviques sont responsables de la chélation et de la mobilisation des ions métalliques, y compris le Fe et l'Al. Compte tenu de leur petite taille moléculaire, les acides fulviques peuvent traverser les micropores des systèmes membranaires biologiques ou artificiels, contrairement aux acides humiques.

4 Le rôle du chitosane

Le chitosane est un biopolymère naturel modifié à partir de chitines qui agit comme un biostimulant et un éliciteur en agriculture. Il est non toxique, biodégradable et biocompatible, ce qui favorise une application très large. Il améliore la réponse physiologique et atténue l'effet néfaste des stress abiotiques. Le traitement avec du chitosane stimule le taux de photosynthèse et la fermeture des stomates, augmente la concentration des enzymes antioxydantes et induit la production d'acides organiques, de sucres, d'acides aminés et d'autres métabolites qui sont exigés pour le contrôle des stomates, la production des signaux métaboliques de stress et la gestion énergétique en condition de stress⁵⁵.

Le chitosane active plusieurs gènes, protéines et métabolites secondaires dans les plantes. Il provoque la production de signaux et augmente la concentration de molécules secondaires telles que le peroxyde d'hydrogène et l'oxyde nitrique. Le traitement préventif avec du chitosane avant l'exposition aux stress abiotiques augmente la croissance de la plante, la production des enzymes antioxydantes et des métabolites secondaires qui favorisent la production des enzymes défensives, et l'acide abscissique (ABA). Cependant, les réponses des plantes dépendent du type de chitosane, des concentrations et des stades de développement des cultures⁵⁶.

L'addition de chitosane à la technologie Oligo Prime® permet d'augmenter la capacité des cellules à produire les enzymes défensifs nécessaires à l'inactivation des ERO causés par les herbicides.

b. Résultats des essais

i. Hypothèses de recherche

Des essais ont été menés pour confirmer l'efficacité du C-plex® et de l'acide fulvique pour faciliter l'absorption et la mobilité des nutriments dans le soja. Les hypothèses spécifiques vérifiées dans cet essai sont :

- ⊙ l'utilisation du C-plex® et de l'acide fulvique en mélange avec des engrais foliaires permet d'améliorer l'absorption et la translocation des nutriments Ca, Mn et B;
- ⊙ la présence d'un stress salin n'a pas d'effet sur l'absorption et la mobilité des nutriments (Ca, Mn, et B);
- ⊙ il y a une interaction entre les technologies et le stress appliqué.

ii. Méthodologie

L'essai a été effectué dans une serre localisée à St-Isidore-de-Laprairie au cours des mois de mars et avril 2021. 72 pots ont été semés avec du soja. Le cultivar Altitude (Secan) a été utilisé.

Traitements :

- ⊙ **Stress : avec et sans solution saline.**
Une solution d'eau salée (1 % V/V) a été utilisée pour irriguer la moitié des pots. Les autres pots ont reçu une eau déminéralisée pour l'irrigation.
- ⊙ **Technologies : avec et sans les technologies C-plex® (agent chélatant) et FulviPro (acide fulvique).**
Ces technologies ont été ajoutées aux engrais foliaires utilisés pour l'essai. Vingt-quatre pots ont reçu les technologies en mélange avec les engrais foliaires contenant du bore (concentré à 10 %), du manganèse (concentré à 7 %) et du calcium (concentré à 12 %) ont été utilisés. Vingt-quatre autres pots ont reçu les engrais foliaires ne contenant pas de technologies. Les 24 derniers pots n'ont reçu que de l'eau. Les engrais foliaires ont été appliqués dans une bouillie (1 % V/V) jusqu'à égouttement.

Lors de l'application au stade V3, les feuilles du bas ont été protégées par une pellicule de plastique (*SaranWrap*) afin que seules les feuilles du haut reçoivent les traitements. Les pellicules ont été retirées immédiatement après les traitements. Les feuilles du bas ont été récoltées 24 heures plus tard et envoyées au laboratoire pour analyse de tissus.



iii. Résultats

Les résultats démontrent que les technologies C-plex® et FulviPro améliorent l'absorption et la mobilité des nutriments vers les feuilles. Le stress salin a causé une différence dans la concentration des nutriments seulement pour le calcium. Il n'y a pas eu d'interactions observées dans les essais.

Calcium (%)				
	Sans technologie	Avec technologies	Témoin	Moyenne
Eau sans sel	2,28	2,49	2,31	2,36 ^a
Eau avec sel	2,15	2,34	1,90	2,13 ^b
Moyenne	2,21 ^a	2,42 ^b	2,11 ^a	

Les différents exposants dans chaque colonne expriment une différence significative entre les traitements à $p = 0,05$

Manganèse (ppm)				
	Sans technologie	Avec technologies	Témoin	Moyenne
Eau sans sel	462,33	1040,10	331,47	611,30 ^a
Eau avec sel	526,90	873,77	328,47	576,38 ^a
Moyenne	494,62 ^a	956,93 ^b	329,97 ^a	

Les différents exposants dans chaque colonne expriment une différence significative entre les traitements à $p = 0,001$

Bore (ppm)				
	Sans technologie	Avec technologies	Témoin	Moyenne
Eau sans sel	445,20	571,20	60,93	359,11 ^a
Eau avec sel	429,83	618,03	61,45	369,77 ^a
Moyenne	437,52 ^b	594,62 ^a	61,19 ^c	

Les différents exposants dans chaque colonne expriment une différence significative entre les traitements à $p = 0,001$



CONCLUSION

7

Pour conclure, rappelons que la fertilisation foliaire est un outil agronomique important qui n'a pas pour rôle de remplacer la fertilisation granulaire de base. La fertilisation foliaire est complémentaire à la fertilisation granulaire et elle s'inscrit de plain-pied dans un programme de fertilisation complet qui vise à favoriser une croissance végétative vigoureuse et équilibrée des cultures.

La fertilisation foliaire prend son importance par l'effet significativement positif qu'elle a sur la croissance, le développement et le rendement des cultures. Son rôle consiste à donner une impulsion dynamique aux plantes en permettant d'ajouter, de façon ciblée, des petites quantités de nutriments à des moments précis pour soutenir la culture à des stades de croissance végétatifs clés et ce, particulièrement lorsque des conditions adverses sont présentes.

Cette flexibilité—pour ne pas dire cette précision—d'intervention permet de corriger ou prévenir l'apparition de carences minérales et d'amplifier certaines caractéristiques physiologiques afin de soutenir la plante et lui donner ainsi une meilleure chance d'atteindre et de maximiser son plein potentiel génétique de production.

Comme nous venons de le montrer, il est essentiel de connaître les facteurs régissant l'efficacité de la fertilisation foliaire afin de maximiser le retour sur investissement qu'offrent ces produits pour votre production.

Les cultures végétales subissent une pression soutenue par les stress abiotiques (sécheresse, basse température, salinité, etc.). L'agriculture se doit plus que jamais d'être résiliente et apte à s'adapter aux conditions agronomiques et environnementales actuelles. La technologie Oligo Prime® travaille avec la plante pour la rendre assez agile pour résister à la pression des stress abiotiques. Conçue pour augmenter l'efficacité des mécanismes de défense naturels présents dans toutes les plantes, la technologie Oligo Prime® active les plantes à mieux performer pour offrir des rendements optimaux.

Les études démontrent qu'en supportant le développement végétatif, la fertilisation foliaire offre une réponse agronomique exceptionnelle aux conditions de culture contemporaines. En plus d'être un véhicule privilégié et efficace pour fournir des nutriments clés à des moments clés du développement de la plante, les produits agroliquides d'Agro-100 contiennent des technologies de biostimulants qui augmentent la résistance aux stress abiotiques tout en favorisant l'absorption et la mobilité des nutriments essentielles à la pleine croissance des plantes.

La fertilisation foliaire avec les produits agroliquides Agro-100 offre la flexibilité d'intervention et de redressement nutritif et cultural pour corriger ou prévenir l'apparition de carences minérales en plus de stimuler l'activité vitale et productive de la plante et des cultures. Force de protection, de défense et de production, la fertilisation foliaire est vraiment un outil important à tout programme complet de fertilisation...



BIBLIOGRAPHIE

8

- 1 HAQ, M., MALLARINO, A. Response of Soybean Grain Oil and Protein Concentrations to Foliar and Soil Fertilization. *Agronomy Journal - AGRON J* 97, (2005).
- 2 LING, F., SILBERBUSH, M. Response of Maize to Foliar Vs. Soil Application of Nitrogen-Phosphorus-Potassium Fertilizers. *Journal of Plant Nutrition* 25, 2333-2342 (2002).
- 3 MENGEL, K. Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition. *Acta Horticulturae* 594, 33-47 (2002).
- 4 TOSCANO, P., GODINO, G., BELFIORE, T., BRICCOLI BATI, C. Foliar fertilization: A valid alternative for olive cultivar. *Acta Horticulturae* 594, 191-195 (2002).
- 5 BLY, A. G., WOODARD, H. J. Foliar Nitrogen Application Timing Influence on Grain Yield and Protein Concentration of Hard Red Winter and Spring Wheat. *Agronomy Journal* 95, 335-338 (2003).
- 6 CHIȚU, V., COMAN, M., BULGARU, L., CHIȚU, E. Effects of 'Calmax' and 'Nutri Vit' foliar fertilisers on plant growth and strawberry fruit quality. *Acta Hortic.* 475-480 (2002) doi:10.17660/ActaHortic.2002.594.61.
- 7 RANDALL, G. W., SCHULTE, E. E., COREY, R. B. Effect of Soil and Foliar-applied Manganese on the Micronutrient Content and Yield of Soybeans. *Agronomy Journal* 67, 502-507 (1975).
- 8 SILVA, A., ROSA, E., HANEKLAUS, S. Influence of Foliar Boron Application on Fruit Set and Yield of Hazelnut. *Journal of Plant Nutrition - J Plant Nutr* 26, 561-569 (2011).
- 9 DELFINE, S., TOGNETTI, R., DESIDERIO, E., ALVINO, A. Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat. *Agron. Sustain. Dev.* 25:2, 183-191 (2005). <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2005017>
- 10 FERNANDEZ, V., BROWN, P. H. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Front. Plant Sci.* 4, (2013).
- 11 ANWAR-UL-HAQ, M. *et al.* Nutrient Management Under Changing Climate. *Climate Change Impacts on Agriculture: Concepts, Issues and Policies for Developing Countries* (eds. Jatoi, W. N. *et al.*) 281-297, Springer International Publishing, Cham. (2023). doi:10.1007/978-3-031-26692-8_16.
- 12 MORADI, L., SIOSEMARDEH, A. Combination of seed priming and nutrient foliar application improved physiological attributes, grain yield, and biofortification of rainfed wheat. *Front. Plant Sci.* 14, (2023).
- 13 ISHFAQ, M. *et al.* Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture. *Environmental and Experimental Botany* 200, 104909 (2022).
- 14 BUKOVAC, M. J., WITTEWER, S. H. Absorption and Mobility of Foliar Applied Nutrients. 123. *Plant Physiol* 32, 428-435 (1957).
- 15 FURUYA, S., UMEMIYA, Y. The influence of chemical. Forms on foliar-applied nitrogen absorption for peach trees. *Acta Horticulturae* 594, 97-103 (2002).
- 16 FAGERIA, N. K., FILHO, M. P. B., MOREIRA, A., GUIMARÃES, C. M. Foliar Fertilization of Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition* 32, 1044-1064 (2009).
- 17 FERNÁNDEZ, V., EICHERT, T. Uptake of Hydrophilic Solutes Through Plant Leaves: Current State of Knowledge and Perspectives of Foliar Fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28, 36-68 (2009).
- 18 DUCATTI, R. D. B., TIRONI, S. P. Enhancing the efficiency and sustainability of foliar fertilization in agriculture. *Agronomy Science and Biotechnology* 10, 1-21 (2024).
- 19 BAR, M., SHTEIN, I. Plant trichomes and the biomechanics of defense in various systems, with *Solanaceae* as a model. *Botany* 97, 651-660 (2019).
- 20 SCHÖNHERR, J. Characterization of aqueous pores in plant cuticles and permeation of ionic solutes. *Journal of Experimental Botany* 57, 2471-2491 (2006).

- 21 HULL, H. M., MORTON, H. L., WHARRIE, J. R. Environmental influences on cuticle development and resultant foliar penetration. *Bot. Rev* 41, 421-452 (1975).
- 22 KIRKWOOD, R. C. Recent developments in our understanding of the plant cuticle as a barrier to the foliar uptake of pesticides. *Pesticide Science* 55, 69-77 (1999).
- 23 Foliar Uptake of Chemicals Studied with Whole Plants and Isolated Cuticles. *Plant Growth and Leaf-Applied Chemicals* (ed. Chamei, A.) (CRC Press, 1988).
- 24 MARSCHNER, H. Uptake and release of miceral elements by leaves and other aerial plant. *Mineral Nutrition of higher plants* 116-130 (Academic Press, 1995).
- 25 HALLAM, N. D. Growth and regeneration of waxes on the leaves of Eucalyptus. *Planta* 93, 257-268 (1970).
- 26 MACEY, M. J. K. The effect of light on wax synthesis in leaves of *Brassica oleracea*. *Phytochemistry* 9, 757-761 (1970).
- 27 REED, D. W., TUKEY, H. B. Light Intensity and Temperature Effects on Epicuticular Wax Morphology and Internal Cuticle Ultrastructure of Carnation and Brussels Sprouts Leaf Cuticles. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 107, 417-420 (1982).
- 28 SCHLEGEL, T. K., SCHÖNHERR, J. J. Selective permeability of cuticles over stomata and trichomes to calcium chloride. in *Acta Horticulturae* 91-96 (International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, 2002). doi:10.17660/ActaHortic.2002.594.7.
- 29 EICHERT, T., BURKHARDT, J., GOLDBACH, H. E. Some factors controlling stomatal uptake. *Acta Hortic.* 85-90 (2002) doi:10.17660/ActaHortic.2002.594.6.
- 30 LEECE, D. R. Foliar Absorption in *Prunus domestica* L. I. Nature and Development of the Surface Wax Barrier. *Functional Plant Biol.* 5, 749-766 (1978).
- 31 HADRAMI, D. A. E. Understanding Deliquescence. *OMEX* <https://omexcanada.com/blog/understanding-deliqescence/> (2011).
- 32 GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *J. RES. NATL. BUR. STAN. SECT. A.* 81A, 89 (1977).
- 33 GUO, L. *et al.* A comprehensive study of hygroscopic properties of calcium- and magnesium-containing salts: implication for hygroscopicity of mineral dust and sea salt aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 2115-2133 (2019).
- 34 ALEXANDER, A. Modern trends in foliar fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 10, 1391-1399 (1987).
- 35 REYES GAIGE, A., ROWE, B., JURIN, V. Assessment of Efficiency of Nutrient Uptake of Different Sources of Zn, Mn, Cu and B in *Zea mays*. *Agriculture* 10, 247 (2020).
- 36 KANNAN, S., CHARNEL, A. Foliar absorption and transport of inorganic nutrients. *Critical Reviews in Plant Sciences* 4, 341-375 (1986).
- 37 YAMADA, Y., WITTEW, S. H., BUKOVAC, M. J. Penetration of Organic Compounds Through Isolated Cuticular Membranes with Special Reference to C¹⁴ Urea. *Plant Physiology* 40, 170-175 (1965).
- 38 FERNÁNDEZ, V., EBERT, G. Foliar Iron Fertilization - A Critical Review. *Journal of Plant Nutrition* 28, 2113-2124 (2005).
- 39 FERRANDON, M., CHAMEL, A. R. Cuticular retention, foliar absorption and translocation of Fe, Mn and Zn supplied in organic and inorganic form. *Journal of Plant Nutrition* 11, 247-263 (1988).
- 40 SWIETLIK, D., FAUST, M. Foliar Nutrition of Fruit Crops. *Horticultural Reviews* 287-355. John Wiley & Sons Ltd., (1984). doi:10.1002/9781118060797.ch8.
- 41 RASHID, A., RYAN, J. Micronutrient Constraints to Crop Production in Soils with Mediterranean-type Characteristics: A Review. *Journal of Plant Nutrition* 27, 959-975 (2004).
- 42 RODRÍGUEZ-LUCENA, P., HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L., LUCENA, J. J. Comparison of iron chelates and complexes supplied as foliar sprays and in nutrient solution to correct iron chlorosis of soybean. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 173, 120-126 (2010).
- 43 CLEMENS, D. F., WHITEHURST, B. M., WHITEHURST, G. B. Chelates in agriculture. *Fertilizer Research* 25, 127-131 (1990).
- 44 PAUL, S. *et al.* Evaluation of pKa Values of Soil Humic Acids and their Complexation Properties. *International Journal of Plant & Soil Science* 6, 218-228 (2015).
- 45 WALLACE, A. Use of synthetic chelating agents in plant nutrition and some of their effects on carboxylating enzymes in plants. *Annals of the New York Academy of Sciences* 88, 361-377 (2006).
- 46 BOARETTO, A. *et al.* Foliar micronutrient application effects on citrus fruit yield, soil and leaf Zn concentrations and ⁶⁵Zn mobilization within the plant. *Acta Horticulturae* 594, 203-209 (2002).
- 47 CHRISTENSEN, P. Additives don't improve zinc uptake in grapevines. *California Agriculture* (1986).
- 48 ERTANI, A., FRANCIOSO, O., TUGNOLI, V., RIGHI, V., NARDI, S. Effect of Commercial Lignosulfonate-Humate on *Zea mays* L. Metabolism. *J. Agric. Food Chem.* 59, 11940-11948 (2011).
- 49 BASU, S., LUTHRA, J., NIGAM, K. D. P. The effects of surfactants on adhesion, spreading, and retention of herbicide droplet on the surface of the leaves and seeds. *Journal of environmental science and health. Part. B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes* 37, 331-44 (2002).
- 50 SCHÖNHERR, J., BUKOVAC, M. J. Penetration of stomata by liquids: dependence on surface tension, wettability, and stomatal morphology. *Plant Physiol* 49, 813-819 (1972).
- 51 BAR-AKIVA, A., HEWITT, E. J. The Effects of Triiodobenzoic Acid and Urea on the Response of Chlorotic Lemon (*Citrus Limonia*) Trees to Foliar Application of Iron Compounds. *Plant Physiol* 34, 641-642 (1959).
- 52 LABANAUSKAS, C. Interactions of nutrients in Valencia orange leaves as affected by the composition of manganese, zinc, and urea sprays. *Hilgardia* 39, 507-513 (1969).
- 53 OKUDA, A., YAMADA, Y. Foliar absorption of nutrients IV: The effect of some organic compounds on the absorption of foliar applied phosphoric acid. *Soil Science and Plant Nutrition* 8, 7-9 (1962).
- 54 HALEY, O. The Role of a Foliar Nutrient Product in Relieving Herbicide-Induced Defects in Crop Growth and Development in *Zea mays*, *Triticum aestivum*, and Glycine max. McGill University, Montreal, Qc. (2017).
- 55 HIDANGMAYUM, A., DWIVEDI, P., KATIYAR, D., HEMANTARANJAN, A. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 25 (2019).
- 56 MUKARRAM, M. *et al.* Chitosan-induced biotic stress tolerance and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. *Frontiers in Plant Science* 14, (2023).