



Article de synthèse

L'application foliaire d'humus comme technologie durable pour améliorer la croissance, le rendement et la protection contre le stress abiotique des cultures agricoles. Une revue



Octávio Vioratti Telles de Moura, Ricardo Luiz Louro Berbara, Danielle França de Oliveira Torchia, Hellen Fernanda Oliveira Da Silva, Tadeu Augusto van Tol de Castro, Orlando Carlos Huertas Tavares, Natália Fernandes Rodrigues, Everaldo Zonta, Leandro Azevedo Santos, Andrés Calderín García [†]

Laboratoire de chimie biologique des sols, Département des sols, Université rurale fédérale de Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, Brésil

ARTICLE EN FO

Historique de l'article :

Reçu le 31 décembre 2022

Révisé le 13 mars 2023

Accepté le 2 mai 2023

Disponible en ligne le 10 mai 2023

Mots-clés :

Substances

humiques

Bioestimulants

Biofertilisants

Phytotechnie

Acides humiques

A B S T R A C T

L'application de substances humiques (SH) favorise les effets bioactifs sur les plantes, stimulant la croissance et le développement, luttant contre les stress biotiques et abiotiques et augmentant la productivité agricole. Il existe d'innombrables exemples d'engrais et de biostimulants fabriqués à partir de SH qui peuvent être utilisés pour former des technologies agricoles intelligentes de pointe avec une efficacité accrue en raison de leur polyvalence et de leur richesse structurelle. Ces dernières années, la phytotechnie associée à l'application des SH sur le feuillage s'est améliorée et les applications ont été étendues à tous les groupes de plantes ; cependant, les études sont désagrégées et encore rares, ce qui entrave l'intégration des données et la mise en œuvre de cette technologie pour les chercheurs, les techniciens et les spécialistes. L'objectif de cette revue était de rassembler toutes les preuves possibles de la capacité des SH à stimuler le métabolisme des plantes lorsqu'ils sont appliqués sur le feuillage. Cette revue a d'abord abordé les caractéristiques de l'application foliaire et des SH. Ensuite, les études ont été organisées par groupes de plantes : légumes, graminées, légumineuses, fruits, oléagineux, plantes médicinales et ornementales. Quel que soit le groupe de plantes, l'application foliaire de SH a stimulé des paramètres tels que la biomasse et la hauteur des plantes et a augmenté les niveaux de pigments photosynthétiques et la productivité agricole. L'application foliaire a favorisé la protection contre les événements de stress, en augmentant l'activité des enzymes peroxydase (POX), catalase (CAT) et phénylalanine ammonium lyase (PAL). La qualité des fruits s'est également améliorée avec l'application foliaire de HS, en particulier la teneur totale en sucre et la quantité d'huile, de protéines et de fibres, entre autres. Sur la base de cette revue, nous proposons des études qui intègrent de nouvelles formes et technologies d'application foliaire d'HS sur les plantes. Des expériences avec différentes sources d'origine, types de plantes et environnements sont nécessaires pour normaliser les formes d'application de ces composés. Nous concluons donc que les SH constituent une technologie viable, respectueuse de l'environnement et très accessible aux petits agriculteurs et aux agriculteurs familiaux.

2023 Les auteurs. Production et hébergement par Elsevier B.V. au nom de l'Université du Roi Saoud. Il s'agit d'un

article en libre accès sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Contenu

1. Introduction	494
2. Fertilisation foliaire	494
3. Les substances humiques et leur action sur les plantes	496
4. Application foliaire de SH aux plantes	498
4.1. Application foliaire de HS dans les légumes	499
4.2. Application foliaire de SH sur les graminées	501
4.2.1. Application foliaire de HS aux légumineuses	503
4.2.2. Application foliaire de SH sur les arbres fruitiers	504
4.2.3. Application foliaire de SH aux graines oléagineuses et aux plantes médicinales	505
4.2.4. Application foliaire de HS sur les plantes ornementales	507

[†] Auteur correspondant à : Université rurale fédérale de Rio de Janeiro.

Adresse électronique : cg.andres@gmail.com (A. Calderín García).

Saoud. Il s'agit d'un article en libre accès sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

5. Conclusions.....508
 Contributions des auteurs.....509
 Déclaration d'intérêts concurrents.....509
 Remerciements.....509
 Références.....509

foliaires et racinaires sont dus à l'adaptation au stress léger qui est régulée principalement par l'action de l'enzyme d'oxydoréduction de l'acide jasmonique.

Ainsi, l'effet des SH sur les plantes lorsqu'ils sont appliqués par voie foliaire a été établi. L'application foliaire est une méthode de fertilisation largement utilisée comme alternative à l'application au sol d'engrais.

1. Introduction

L'éradication de la faim, de l'insécurité alimentaire et de toutes les formes de malnutrition est l'un des plus grands défis de l'humanité. On estime qu'en 2020, entre 720 et 811 millions de personnes souffriront de la faim dans le monde et que plus de 2 milliards d'individus n'auront pas accès à une alimentation adéquate ; ces deux valeurs indiquent des augmentations significatives par rapport à celles des enquêtes précédentes, et cette situation est exacerbée par l'augmentation de la population mondiale qui atteindra huit milliards de personnes en 2022 (FAO, 2022). Il est donc essentiel d'adopter des pratiques agricoles modernes capables de répondre à cette demande alimentaire, en utilisant des approches plus durables qui réduisent la dégradation des sols et la contamination de l'eau (Cristofano et al., 2021 ; Lipper et al., 2014). Les biostimulants végétaux tels que les acides aminés et les acides humiques font partie des approches les plus efficaces à cet égard (Souri et Hatamian, 2019 ; Amiri Forotaghe et al., 2022 ; Najarian et al., 2022).

Les substances humiques (SH) sont des matériaux dérivés de la décomposition de résidus végétaux, animaux et microbiens et de l'activité métabolique des micro-organismes du sol, correspondant à environ 80 % de la matière organique du sol (MOS), et on les trouve également dans les environnements aquatiques et dans l'atmosphère (Amador et al., 2018). Ces composés sont connus pour leurs propriétés biostimulantes et sont utilisés par les agriculteurs pour réduire l'utilisation de produits agrochimiques et utiliser plus efficacement les nutriments afin de parvenir à une production alimentaire plus durable (Monda et al., 2021). Cela est principalement dû au fait qu'elles peuvent interagir avec les plantes de manière positive ou négative, en stimulant ou en inhibant le développement des plantes, ce qui est également appelé bioactivité des SH. Ces substances ont un effet bénéfique sur le cycle de vie des plantes grâce à leur rôle dans le développement des racines et des feuilles, à l'augmentation de l'absorption des nutriments et à la régulation des enzymes fondamentales pour le métabolisme des plantes. Notamment, le potentiel bioactif des SH dépend de facteurs tels que l'espèce recevant les SH, l'organe traité avec les SH, l'âge de la plante, la dose recommandée de SH, la source de matière organique à partir de laquelle les SH ont été extraits, et les caractéristiques physicochimiques spécifiques des SH (Zandonadi et al., 2014). L'action stimulante des HS est bien reconnue dans la littérature scientifique. La bioactivité que les HS exercent sur les plantes dépend fortement des caractéristiques structurelles des HS et se produit initialement par le biais d'interactions chimico-physiques avec le système racinaire de la plante (Asli and Neumann 2010). Ces interactions HS-racines favorisent l'obstruction des pores et modifient leur fonctionnement, créant une perception de stress léger appelée "eustress" chez les plantes. Dans cet état physiologique, les plantes régulent les niveaux d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) par la synthèse d'enzymes redox. Ce mécanisme d'action favorise la croissance des racines des plantes et les protège contre le stress (García et al., 2016 ; Castro et al., 2021, 2022). Les études menées par de Hita et al. (2020) ont montré que les effets bénéfiques des SH lorsqu'ils sont appliqués aux tissus

Cette pratique a été utilisée pour appliquer des macro- et micronutriments, ainsi que des biostimulants et des engrais humiques. Cette pratique a été utilisée pour appliquer des macro- et micronutriments, ainsi que des biostimulants et des engrais humiques, favorisant l'assimilation et l'utilisation des nutriments par les plantes et augmentant le rendement et la qualité des cultures (Manuel-Tejada et al., 2018). L'utilisation d'extraits de compost enrichis en HS est un outil économiquement important pour la pulvérisation foliaire, en particulier lorsque l'absorption des nutriments du sol est altérée, comme dans des conditions calcaires dues à la précipitation des nutriments. Cependant, ce type de fertilisation est limité à certaines conditions climatiques, car les températures élevées, les précipitations et le vent réduisent son efficacité. De même, des taux d'application élevés peuvent endommager les plantes, notamment par des brûlures foliaires dues à la concentration de sels après évaporation de l'eau (Jindo et al., 2020).

Les SH ont la capacité de protéger les plantes contre les stress abiotiques et biotiques, ainsi que de stimuler leur croissance et leur développement, ce qui favorise l'augmentation des rendements et de la production agricole (Perminova et al., 2019). L'utilisation des SH dans les engrais et les biostimulants végétaux a augmenté ces dernières années et fait partie de la phytotechnie et de la gestion actuelle de diverses cultures dans différentes parties du monde (Olk et al., 2018). Malgré ce scénario, il est toujours nécessaire de comprendre les modes d'action et les mécanismes de régulation qui régissent les actions des plantes lorsque les SH et les engrais à base de SH sont appliqués par voie foliaire. La plupart des études actuelles sont incomplètes et encore insuffisantes, ce qui entrave l'avancement de la recherche et la compréhension des spécialistes et des techniciens dans les domaines et les secteurs en question. La présente analyse vise donc à identifier et à consolider les principaux résultats obtenus dans ces études sur l'application foliaire de SH dans les cultures d'intérêt économique les plus diverses, que ce soit dans le cadre d'expériences sur le terrain ou dans des serres. Pour cette étude, les espèces ont été réparties dans les groupes suivants : légumes, graminées, légumineuses, fruits, oléagineux, plantes médicinales et ornementales. Ainsi, une évaluation générale de la capacité des SH à améliorer le développement et la croissance des plantes par pulvérisation foliaire a été réalisée, et en fonction du niveau de protection contre le stress par les SH, les doses et les temps d'application idéaux ont été déterminés.

2. Fertilisation foliaire

La capacité des plantes à absorber l'eau de l'environnement à travers leurs feuilles est connue depuis environ trois cents ans. Cependant, l'absorption des nutriments et ses effets physiologiques n'ont été démontrés qu'au 19e siècle, notamment grâce aux travaux pionniers de Gray en 1843, qui a évalué l'application foliaire d'une solution nutritive comme alternative à la fertilisation des vignes (Fernández et al., 2013). Parallèlement à ces études, la compréhension de la structure de la surface des feuilles a également progressé (Brongniart 1834 ; von Dohl 1947). Au cours de la seconde moitié du 19e siècle, des études sur les échanges gazeux, la transpiration, l'anatomie et la physiologie des feuilles ont été publiées (Boussingault 1868 ; Merget 1873 ; Sachs 1884, van Wissenlingh 1895). Au 20e siècle, les chercheurs ont utilisé des techniques utilisant des isotopes

La technique de fertilisation foliaire consiste à fournir des nutriments directement aux feuilles en pulvérisant une solution contenant un ou plusieurs éléments nutritifs essentiels au développement de la plante qui doivent être distribués aux autres parties de la plante (Mocellin 2004 ; Fernández et al., 2013). Cette méthode est considérée comme rapide et efficace pour remédier à la malnutrition des plantes, car elle leur fournit des nutriments plus facilement que l'application au sol (absorption par la racine) (Fageria et al., 2009). Cependant, la fertilisation foliaire ne doit pas remplacer complètement la fertilisation du sol, mais doit être une technique complémentaire à mettre en œuvre dans les périodes critiques de forte demande des plantes ou lorsque les nutriments du sol ne sont pas disponibles (Nachtiqaï et Nava 2010).

L'un des facteurs qui influencent les performances de la fertilisation foliaire est la caractéristique de la plante elle-même, en particulier les feuilles. Les surfaces foliaires sont généralement recouvertes de cuticules, qui sont des tissus de couverture composés de biopolymères hydrophobes qui bloquent la perte d'humidité (Kritzing et Lötze 2019). Les cuticules peuvent avoir des cires intégrées (intracuticulaires) ou des dépôts sur leurs surfaces (épi-cuticulaires), et leurs principaux polymères sont la cutine et la cutane, qui se trouvent dans des proportions variables en fonction de l'espèce végétale (Jeffree 2007). Grâce à ces composants, la cuticule présente un réseau complexe d'acides gras interestérisés (C_{16} et/ou C_{18}), ainsi que des n-alcools (C_{20} - C_{40}), des n-aldéhydes et des n-alcane (constituants des cires) (Fernández et al., 2013).

En raison de cette caractéristique hydrophobe des surfaces foliaires, la perméabilité cuticulaire est nécessaire à l'écoulement de la solution nutritive. En outre, les cuticules sont généralement composées de trois couches : la couche la plus externe, où prédominent les cires épicuticulaires ; la couche matricielle de biopolymères (cutine et/ou cutanée) et de cires intracuticulaires ; et la couche la plus interne, contenant, en plus des biopolymères susmentionnés, des polysaccharides provenant des parois cellulaires des cellules épidermiques. Les lamelles moyennes et les couches de pectine se trouvent juste en dessous de cette couche cuticulaire la plus interne, de sorte qu'une certaine quantité de fibrilles de polysaccharides et de lamelles de pectine s'étendent à partir de la paroi cellulaire, reliant ce tissu sous-jacent à la cuticule (Fernández et al., 2013). Il y a donc une augmentation progressive des charges négatives de la cire épicuticulaire vers la couche de pectine, ce qui crée un gradient électrochimique et peut provoquer le mouvement des cations et des molécules d'eau (Franke 1967). Il existe un domaine d'étude qui considère la présence possible de "pores aqueux" résultant de l'absorption de molécules d'eau par des unités polaires de la cuticule, ce qui expliquerait la pénétration de solutés hydrophiles. Cependant, aucune preuve n'a été trouvée pour soutenir cette théorie (Fernández et al., 2013).

Il existe différentes structures à la surface des plantes (stomates, triades, etc.).

Les stomates sont de petits pores spécialisés constitués de deux cellules de garde, dont la dynamique d'ouverture et de fermeture contrôle les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère (Gerardin et al. Les stomates sont de petits pores spécialisés constitués de deux cellules de garde, dont la dynamique d'ouverture et de fermeture contrôle les échanges gazeux entre la feuille et l'atmosphère (Gerardin et al., 2018 ; Huang et al., 2020). Les trichomes sont des appendices unicellulaires ou multicellulaires qui dépassent de l'épiderme (Bustamante-Eguiguren et al., 2020) et peuvent faciliter l'absorption des nutriments en raison de leur faible cutinisation (Tagliavini et Toselli 2005). Les lenticelles sont des structures épidermiques macroscopiques que l'on peut trouver sur les tiges, les pédicelles ou les fruits et qui peuvent également absorber les solutions appliquées sur les parties aériennes des plantes (Fernández et al., 2013). En

évaluant l'absorption possible de solutions aqueuses par les stomates, (Burkhardt et al., 2012) ont confirmé l'existence de ce processus, la surface abaxiale (stomatique) des feuilles de pommier ayant absorbé davantage que la surface adaxiale (non stomatique). Dans le même sens, (Schreel and Steppe 2020), une revue sur l'absorption d'eau foliaire par plusieurs groupes de plantes a souligné le rôle fondamental des stomates pour permettre l'entrée de l'eau et d'autres solutés dans les cellules végétales. Les deux études citées ci-dessus soulignent également l'influence que les particules d'aérosols (par exemple, les sels hygroscopiques) déposées naturellement sur les surfaces foliaires exercent sur l'humidification des feuilles et l'absorption de l'eau.

Q. Fioratti, Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Ces substances, lorsqu'elles subissent des cycles répétés de déliquescence (absorption de l'humidité de l'air jusqu'à la formation d'une solution) et d'efflorescence (perte d'eau dans l'atmosphère), peuvent provoquer le développement de fines pellicules d'eau sur la surface hydrophobe des feuilles. Ces particules hygroscopiques sont capables de modifier l'hydrophobie cuticulaire et la tension superficielle de l'eau, ce qui permet d'augmenter l'humidification de la surface des feuilles et de favoriser l'absorption de l'eau et des nutriments. (Burkhardt et al., 2012).

Outre le dépôt naturel de substances hygroscopiques à la surface des feuilles, le mouillage et l'absorption des solutions nutritives par ces organes aériens peuvent également être favorisés par l'ajout de coformulants dans la solution fertilisante appliquée, également appelés adjuvants. Il existe plusieurs types de ces produits qui sont catégorisés selon leur mode d'action : les surfactants (réduisent la tension de surface), les adhésifs (augmentent la rétention de la solution, assurant une plus grande résistance à la pluie), les pénétrants (augmentent le taux de pénétration foliaire, "solubilisant" les cuticules), les humectants (ralentissent le séchage de la solution en abaissant le point de déliquescence de la formulation sur la feuille), parmi d'autres (Fernández et al., 2013). Rodrigues et al. (2020) ont évalué l'application foliaire de nitrates de lanthane (La) et de cérium (Ce) sur du soja et ont constaté que l'ajout de l'agent tensioactif Triton HW 1000 à 0,01 % réduisait l'angle de contact des gouttelettes sur les deux faces des feuilles, augmentant ainsi la mouillabilité. En raison de cette efficacité accrue dans le mouillage des surfaces foliaires et de l'absorption des engrais par les plantes, les adjuvants ont également contribué à réduire les impacts négatifs sur l'environnement, étant donné l'utilisation de plus petites quantités d'ingrédients actifs dans les formules et le fait que la majeure partie du produit appliqué est en fait utilisée par les plantes (Kovalchuk et Simmons, 2021).

Malgré les avantages de la fertilisation foliaire, il est difficile d'obtenir des résultats satisfaisants.

Il n'est pas possible de prédire les réponses des plantes car l'efficacité de cette procédure dépend de plusieurs facteurs, tels que l'espèce végétale en question, la composition de la cuticule des feuilles, le moment de l'application, les aspects phénologiques et les conditions environnementales (Portu et al., 2015). Selon Fageria et al. (2009), pour que l'absorption foliaire soit efficace, il est essentiel que les stomates soient ouverts et que la température ne soit pas trop élevée afin d'éviter des dommages tels que des brûlures foliaires. De même, ces auteurs recommandent que les applications ne soient pas effectuées les jours venteux et pluvieux jusqu'à 4 heures après la pulvérisation, ce qui affecterait l'humidité du feuillage. del Amor et Cuadra-Crespo (2011) ont travaillé avec des plants de poivrons (*Capsicum annum* L., cv. Herminio) et ont mis en évidence l'influence de la température sur la réponse antioxydante de la plante après l'application foliaire d'urée. Le moment de la pulvérisation peut également être un facteur déterminant dans le succès de cette technique de fertilisation. Analysant l'application foliaire de manganèse (Mn) sur le concombre (*Cucumis sativus* L.) pour accroître la résistance à l'oïdium (maladie fongique causée par le champignon *Podosphaera fuliginea*), Eskandari et Sharifnabi (2020) ont constaté que l'intervalle le plus court entre la pulvérisation des nutriments et l'inoculation du pathogène permettait d'obtenir une efficacité maximale de la fertilisation. Portu et al. (2015) ont étudié la production de composés phénoliques dans les raisins après une fertilisation foliaire à l'urée et ont souligné que les réponses des plantes étaient liées au moment de l'application, car l'accumulation de ces composés s'intensifie après la maturation, lorsque la croissance végétative est plus lente, ce qui favorise cette plus grande réserve de métabolites secondaires.

Froni et al. (2021) ont évalué l'influence de l'*Ascophyllum nodosum*, une algue brune, sur des vignes soumises à un stress

hydrique progressif, en comparant deux méthodes d'application : foliaire et au sol. Ces auteurs ont constaté que les deux formes de traitement avaient des résultats contrastés, la pulvérisation foliaire étant plus efficace que l'application au sol, préservant l'intégrité de l'appareil photosynthétique et rétablissant plus rapidement la fonction physiologique de la feuille pendant la période de réhydratation. De même, Zhou et al. (2021) ont étudié l'effet des applications foliaires et au sol de sélénium (Se) et de silicium (Si) pour réduire la toxicité du cadmium (Cd) dans les variétés de blé (*Triticum turgidum* L.). L'application au sol de Si et de Se s'est avérée efficace pour contrôler la toxicité du Cd dans les variétés de blé (*Triticum turgidum* L.).

La méthode foliaire s'est avérée efficace pour une seule variété. Ces résultats sont dus à la régulation des gènes transporteurs de Cd et à l'amélioration de l'activité des enzymes antioxydantes. D'autre part, [Boldrin et al. \(2013\)](#) ont conclu que l'application de Se dans le sol était plus efficace que l'application foliaire pour augmenter les concentrations de Se dans les grains de riz.

Une autre façon de procéder à la fertilisation foliaire des cultures consiste à utiliser des SH, qui sont des matières organiques structurellement irrégulières largement présentes dans les sols, les rivières, les océans et les sédiments, ainsi que dans les ressources naturelles liées au charbon (tourbe, léonardite et lignite) ([Jung et al., 2021](#)). Ces substances sont des composés formés par la transformation chimique et biologique de résidus animaux et végétaux sous l'action des micro-organismes du sol et ont la capacité de favoriser la croissance des plantes et l'assimilation des principaux nutriments dont elles ont besoin, tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) ([Leite et al., 2020](#)). Cependant, en raison de leur grande complexité structurelle, la nature des SH n'est toujours pas claire, de sorte que la relation entre leurs effets bénéfiques sur les plantes et leur structure moléculaire a fait l'objet de nombreuses études qui ont même produit des résultats contrastés ([Pizzeghello et al., 2020](#)). Ainsi, les principales formes d'action des SH sur le développement des plantes sont discutées ci-dessous, et les résultats des études qui ont évalué leur application foliaire sur différentes cultures seront présentés ([Fig. 1](#)).

3. Substances humiques et leur action sur les plantes

Les SH sont des mélanges complexes de matières organiques hétérogènes naturellement présentes dans les sols, les eaux et les sédiments ([Stevenson 1994](#)) qui ont été largement transformées depuis leur production, par exemple par les plantes ([Tranvik 2014](#)). D'un point de vue opérationnel, ils peuvent être séparés et classés dans les fractions suivantes : les acides fulviques (AF, solubles à pH acide et alcalin), les acides humiques (AH, insolubles à pH acide et solubles à pH alcalin) et l'humine (insoluble à pH acide et alcalin) ([Stevenson 1994](#)).

Les SH sont formés par un processus connu sous le nom d'humification, un processus hétérogène et complexe, où des réactions de transformation chimique, biochimique, et enzymatique se produisent dans les sols et dans les systèmes naturels, décomposant et créant les conditions nécessaires à la formation d'une couche d'humus dans le sol.

Le processus d'humification dépend des caractéristiques chimiques et structurelles des molécules incorporées dans le sol et de l'ampleur de ce processus. Le processus d'humification dépend des caractéristiques chimiques et structurelles des molécules incorporées dans le sol et de l'ampleur de ce processus. Le taux d'humification est régulé par les conditions environnementales, c'est-à-dire l'humidité du sol, la composition minéralogique, la quantité et la diversité du biote du sol. L'humification produira donc des SH spécifiques dans chaque environnement où ils sont formés. Ainsi, un SH possède un seul noyau structurel avec un niveau d'organisation supramoléculaire, spécifique et commun à ce groupe de composés mais avec des quantités relatives variables de structures dans sa composition ([Aguiar et al., 2022](#)).

Le modèle structurel supramoléculaire appliqué aux HS semble mieux expliquer les propriétés chimiques et les fonctions des HS dans l'environnement. Dans le modèle structurel supramoléculaire, les SH sont composés de petites molécules hétérogènes disposées dans des structures de molécules plus grandes et unies par de faibles interactions inter-moléculaires, des interactions de van der Waal, des interactions hydrophobes et des interactions entre les molécules.

(p -p, CH-p) et des liaisons hydrogène ([Piccolo 2002](#), [Nebbioso et al., 2014](#)). La structure des HS dans une organisation supramoléculaire est considérée comme stable dans le sol, où ces composés sont eux-mêmes organisés avec un domaine de surface formé par des structures polaires et hydrophiles, impliquant un domaine disposé vers l'intérieur de la structure avec des caractéristiques aromatiques et hydrophobes ([Fischer 2017](#)). La modélisation chimique computationnelle a déjà montré que la formation de structures supramoléculaires se produit dans le sol et commence par une absorption, au niveau des surfaces réactives de la fraction minérale du sol, de molécules plus petites ou de sous-agrégats moléculaires partiels qui servent de base à la formation d'agréats multimoléculaires plus grands ([Gerzabek et al., 2022](#)) ([Fig. 2](#)).

Les HS ont la capacité d'améliorer l'état nutritionnel des plantes de différentes manières : augmentation de l'expression des isoformes de gènes qui codent pour les pompes à protons de la membrane plasmique (PM H⁺-ATPase) des racines et augmentation de leur activité ([Tavares et al., 2017](#) ; [Zandonadi et al., 2007](#)) ; promotion du transport des ions vers les tissus végétaux ; régulation de l'expression des gènes qui codent pour les principaux transporteurs de nutriments dans les racines ; et augmentation de l'activité des enzymes qui affectent le métabolisme de l'eau et de l'air dans les racines.

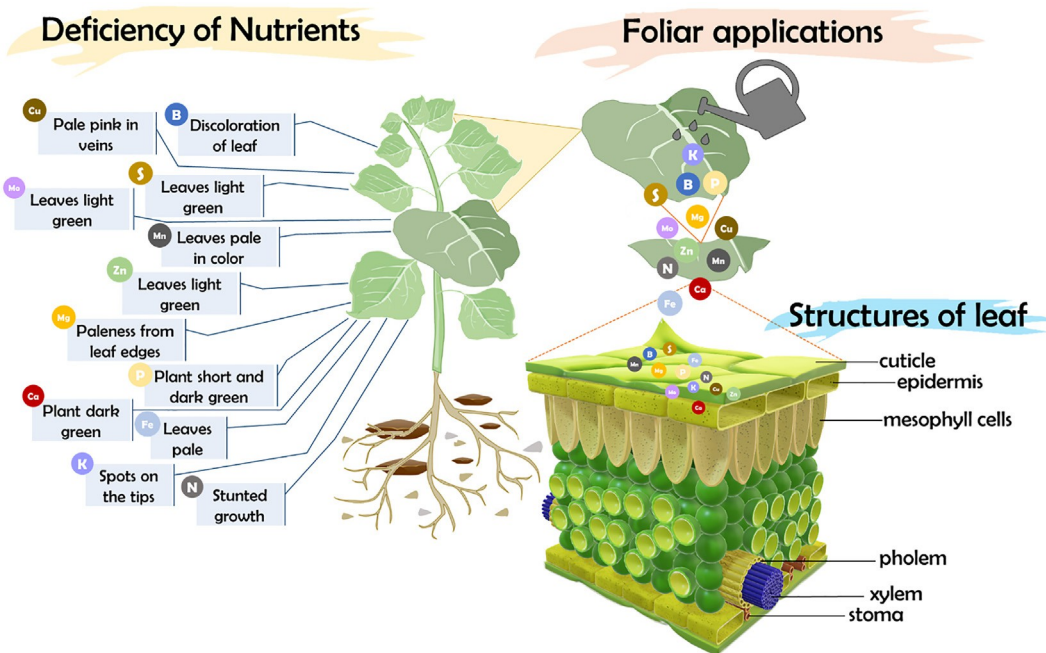


Fig. 1. Structure de la feuille, montrant les cuticules recouvrant les tissus hydrophobes. Extrait de Fernández et al. (2013).

Pinton 1995 ; Muscolo et al., 2013 ; Nardi et al., 2021). Il existe des preuves que les SH peuvent être considérées comme une source environnementale d'acide indole acétique (IAA), un type d'auxine, qui est l'auxine la plus étudiée.

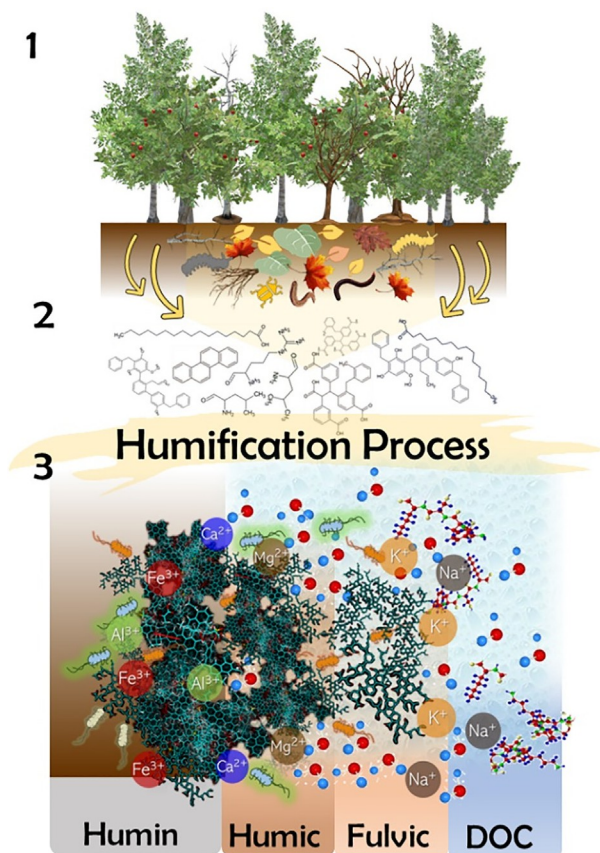


Fig. 2. Schéma illustrant la formation de structures humiques supramoléculaires à partir du dépôt de matière organique dans le sol. 1) Dépôt de débris végétaux et animaux dans le sol. 2) Incorporation de molécules organiques dans le sol, produits de décomposition, et 3) formation de fractions humiques et de carbone organique dissous (Aguiar et al. 2022).

l'utilisation des nutriments (par exemple, la nitrate réductase, la glutamine synthétase, la glutamate synthétase et la phosphoenolpyruvate carboxylase - PEP- case.) (Urrutia et al., 2020). Par conséquent, les SH agissent sur l'assimilation de l'azote et le métabolisme du carbone, en plus de la synthèse de métabolites secondaires, tels que les phénylpropanoïdes (Zanin et al., Vaccaro et al. (2015) ont constaté un effet positif de faibles doses de SH sur les activités des principales enzymes impliquées dans la réduction et l'assimilation de l'azote inorganique dans les semis de maïs, tandis que Leventoglu et Erdal (2014) n'ont constaté aucun effet positif de taux élevés de SH sur la croissance des plantes et les concentrations de nutriments dans le maïs cultivé dans des sols fortement calcaires. Akladiou et Mohamed (2018) ont quant à eux constaté que la dose la plus élevée d'AH (1500 mg. kg⁻¹ de sol) était plus efficace que la dose la plus faible (750 mg. kg⁻¹ de sol) pour augmenter les niveaux d'azote, de phosphore et de potassium dans les plants de poivrons (*Capsicum anuum* L.) soumis à un stress salin. Ces auteurs ont également observé l'influence du SH sur les teneurs en antioxydants et en métabolites secondaires, comme en témoignent les augmentations des teneurs en anthocyanes, en acide ascorbique et en flavonoïdes totaux dans les pousses de poivrons.

En raison de toute l'influence de l'HS sur la promotion de la croissance des plantes,

La question de savoir s'ils exercent une éventuelle activité hormonale reste posée. Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont démontré cette autre action potentielle des SH dans la stimulation du développement des plantes (O'Donnell 1972 ; Albuzio et al., 1989 ; Nardi et al., 1994 ; Varanini et

O. Fioratti, Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbarq, D. França de Oliveira Torchia et al., classe de phytohormones agissant dans la division et l'expansion cellulaires (Zandonadi et al., 2010). On pense que les SH peuvent se comporter comme une auxine exogène, régulant la croissance et la morphologie des racines. En effet, ces matériaux humifiés contiennent de l'IAA et d'autres molécules ayant une activité similaire à l'IAA, qui peuvent être d'origine microbienne ou végétale dans le sol (Nardi et al., 2021). Outre les auxines, des activités liées à d'autres phytohormones, telles que la cytokinine et la gibbérelline, ont été observées dans les SH. Pizzeghello et al. (2013) ont trouvé pour la première fois la présence d'isopentenyladenosine (IPA), une cytokinine, à des concentrations physiologiquement actives dans des matériaux humiques provenant de différentes sources, tandis que des auteurs tels que Nardi et al. (2000a, 2000b) et Pizzeghello et al. (2002) ont rapporté des activités similaires à la gibbérelline dans les SH. Selon Nardi et al. (2018), cette action hormonale observée dans les SH est raisonnable car les sols ont des concentrations d'auxine variables, qui sont plus élevées dans les sols plus fertiles. En outre, ces auteurs ont également déclaré que les niveaux d'auxine et de gibbérelline sont, en règle générale, plus élevés dans la région de la rhizosphère, probablement en raison de l'augmentation des populations microbiennes et du métabolisme dû à la présence de ces exsudats racinaires. Enfin, les auteurs ont souligné que les effets hormonaux observés n'étaient pas nécessairement en corrélation avec les niveaux d'auxine identifiés dans les HS, ce qui alimente le débat sur la présence possible de différents composés de la famille de l'auxine ou de molécules à structure humique qui imitent l'action ou stimulent le métabolisme endogène de cette phytohormone dans les plantes.

Un autre point important dans les études sur les effets des HS sur les plantes est le fait qu'il n'y a pas d'effet de serre.

L'action protectrice que ces substances confèrent aux plantes contre différents types de stress était au cœur de la croissance des plantes. De nombreuses études ont été publiées identifiant l'importance de l'AH pour agir contre les stress causés par les métaux lourds (Pittarello et al., 2018 ; Duan et al., 2020 ; Haider et al., 2021), la salinité (Hatami et al., 2018 ; Saidimoradi et al., 2019), la sécheresse (Khorasaninejad et al., 2018 ; Qiu et al., 2021), et les températures élevées (Cha et al., 2020 ; Khan et al., 2020). Yildirim et al. (2021) ont constaté que l'application d'une formulation contenant de l'AH et de l'AF était efficace pour atténuer les impacts négatifs causés par l'accumulation de cadmium (Cd) dans le cresson de jardin (*Lepidium sativum* L.).

Ces auteurs ont constaté que le traitement aux HS augmentait la masse fraîche et sèche des racines et des pousses, le diamètre des tiges, la surface foliaire et les teneurs en nutriments et réduisait les activités des enzymes antioxydantes catalase (CAT) et superoxyde dismutase (SOD) et augmentait les activités de l'enzyme peroxydase (POD). Les SH contribuent au développement des plantes dans des conditions de stress en améliorant la photosynthèse, la respiration, la perméabilité de la membrane cellulaire et l'absorption de nutriments tels que le phosphore et le potassium, en plus d'assurer un équilibre hormonal (Kaya et al., 2020). L'application de ces composés humifiés en situation de stress peut également déclencher une réponse antioxydante. Le stress causé par les métaux, comme le Cd, augmente la production de ROS, comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et l'anion superoxyde ($O_2^{\cdot-}$) (Ozfidan-Konakci et al., 2018).

Malgré la toxicité causée par les ROS, ces espèces chimiques ont également le potentiel d'agir en tant que molécules de signalisation et de régulation. Lors de stress abiotiques, les ROS produits signalent des changements et régulent l'expression des gènes (Demidchik et al., 2007). L'action des effets négatifs ou positifs des ROS dépend de l'équilibre homéostatique entre la production et l'élimination des ROS qui peut altérer le rôle régulateur de ces substances de signalisation, favorisant les effets négatifs (Monda et al., 2021). Selon García et al. (2019), les interactions entre les fragments humiques et les racines des

plantes provoquent des changements dans l'homéostasie redox, qui régule les niveaux de ROS et médiate l'action des SH dans les plantes, en particulier les mécanismes associés à la croissance et au développement des racines. Cette interaction des HS avec les racines provoque une agglomération à la surface des racines, entraînant l'expression d'enzymes antioxydantes telles que la CAT et augmentant les niveaux de ROS, qui agissent comme des intermédiaires dans la croissance des plantes (García et al., 2012). Ainsi, lorsqu'ils sont appliqués au sol ou

Les SH peuvent agir comme des eustrateurs, c'est-à-dire des facteurs de stress qui déclenchent un niveau de stress léger et transitoire chez les plantes, ce qui entraîne une amélioration du métabolisme et de la production végétale (Castro et al., 2021). Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est un ROS assez stable dans les plantes et qui se diffuse à travers les membranes, de sorte que de petites concentrations de H_2O_2 peuvent entraîner l'adaptation des plantes à divers types de stress, et ce processus peut se produire grâce à son rôle de molécule de signalisation (García et al., 2012). En travaillant sur l'application d'AH de différentes origines sur des plants de riz (*Oryza sativa* L.), Castro et al. (2021) ont observé qu'initialement (96 h), le traitement avec la matière humique réduisait la performance photosynthétique des plants. Cependant, après 144 h d'application, il y a eu une augmentation de la photosynthèse, et après 192 h, l'activité photosynthétique a été rétablie, ce qui a entraîné des changements dans le métabolisme de l'azote et le développement de la plante, indiquant qu'il y avait un état d'eustress après l'application de HS.

L'action des HS sur les plantes est directement liée à la structure des HS (Fig. 3). Des études réalisées avec 37 fractions de matières organiques humifiées ont montré que lorsqu'elles sont appliquées à des plants de riz via les racines, les structures C-aliphatiques, C-aromatiques substituées et C-carboxyliques des SH sont responsables de la croissance des racines, tandis que dans les AH, les structures C-aliphatiques, C-aromatiques non substituées et C-carboxyliques sont responsables de la bioactivité dans les plantes (García et al., 2016). Comme indiqué précédemment, les SH sont capables de stimuler la croissance des plantes par le biais de l'eustress, un type de stress doux et bénéfique qui favorise l'augmentation de la biomasse, améliore la nutrition des plantes et protège contre le stress abiotique. (García et al. 2019). Les composés de type HS obtenus à partir de résidus de lignine ont montré que les structures responsables de la bioactivité dans les plantes de maïs sont C-méthoxyle et C-aromatique (Savy et al., 2020). Dans Monda et al. (2018), les matériaux humiques plus hydrophobes étaient actifs à faible concentration qu'à forte concentration, favorisant leur adhésion aux surfaces racinaires du maïs (*Zea mays* L.), et ceux ayant une teneur plus élevée en composés phénoliques (inhibiteurs potentiels de l'absorption de l'azote) exerçaient cette bioactivité à des concentrations plus élevées, formant des agrégats supramoléculaires plus grands et conformationnellement plus stables, et empêchant la libération de ces molécules toxiques. Dans une revue récente de la relation entre la composition structurelle et la bioactivité des SH, Nardi et al. (2021) ont déclaré que ces effets de promotion de la croissance des plantes dépendent de facteurs tels que l'origine des SH, le dosage, le degré d'hydrophobie et d'aromaticité, la taille moléculaire et la distribution spatiale des domaines hydrophobes et hydrophiles. Les auteurs ont souligné que les SH de petite taille moléculaire sont capables de pénétrer dans les cellules des racines et de déclencher directement des signaux intracellulaires, tandis que les SH de grande taille sont capables de pénétrer dans les cellules des racines et de déclencher directement des signaux intracellulaires.

peuvent se lier à des récepteurs cellulaires externes pour induire des réponses moléculaires.

4. Application foliaire de SH aux plantes

Il a été démontré que les SH ont des effets bénéfiques sur divers groupes de plantes, tels que les légumes, les graminées, les légumineuses, les fruits, les oléagineux et les plantes médicinales et ornementales. Les effets sont divers et comprennent des changements au niveau biochimique, morphologique et de la protection contre le stress (tableau 1). En raison de tous les effets des HS sur la croissance des plantes, ces substances sont largement utilisées comme biostimulants pour plusieurs cultures d'intérêt agronomique. Bien que la plupart des études portent sur l'application de ces matières humiques aux racines des plantes, une autre façon de fournir des SH est l'application directe sur les feuilles (Olaetxea et al., 2018). Contrairement aux effets des SH sur les racines (activation de la H^+ -ATPase, transport d'ions dans la membrane plasmique, réponses hormonales, entre autres), les effets sur les feuilles ont été peu explorés, et il existe des rapports selon lesquels l'application foliaire de composés humifiés augmente les niveaux de chlorophylle et agit sur la photosynthèse. En outre, l'application foliaire influence également la transpiration, bien que les mécanismes soient encore incertains, avec des augmentations et des diminutions de la perte d'eau et des échanges gazeux dans les feuilles (Rose et al., 2014).

Les études réalisées par Olaetxea et al. (2018) ont mis en évidence que les effets positifs de l'application de SH sur les feuilles sont probablement régus par des mécanismes différents de ceux déclenchés par l'application de SH sur les racines. Ces auteurs ont également souligné qu'il est possible que le traitement des SH via les feuilles dans des conditions de terrain génère également un certain effet sur le sol parce qu'une partie de la solution appliquée n'atteint pas les feuilles ou qu'il y a un éventuel ruissellement des SH après l'application sur les feuilles. Toutefois, dans les cultures à grande surface foliaire et à forte densité de plantes, ce fait devient négligeable. De plus, la pulvérisation foliaire de SH seuls peut stimuler le développement des racines et des pousses des plantes traitées, et cette méthode a le potentiel d'être plus économique que l'application au sol car les quantités de produit demandées sont relativement faibles (Chen et Aviad 1990). Kishor et al. (2021) ont constaté que, par rapport au traitement de contrôle avec seulement un engrais NPK, l'application combinée d'AH sur les feuilles et le sol, plus 100% d'une dose recommandée d'engrais (NPK) dans trois parcelles plus la pulvérisation foliaire d'un mélange de nutriments, était le traitement le plus efficace et avait le rendement économique le plus élevé dans les plants de café, augmentant leur rendement, ainsi que la teneur en nutriments dans les feuilles.

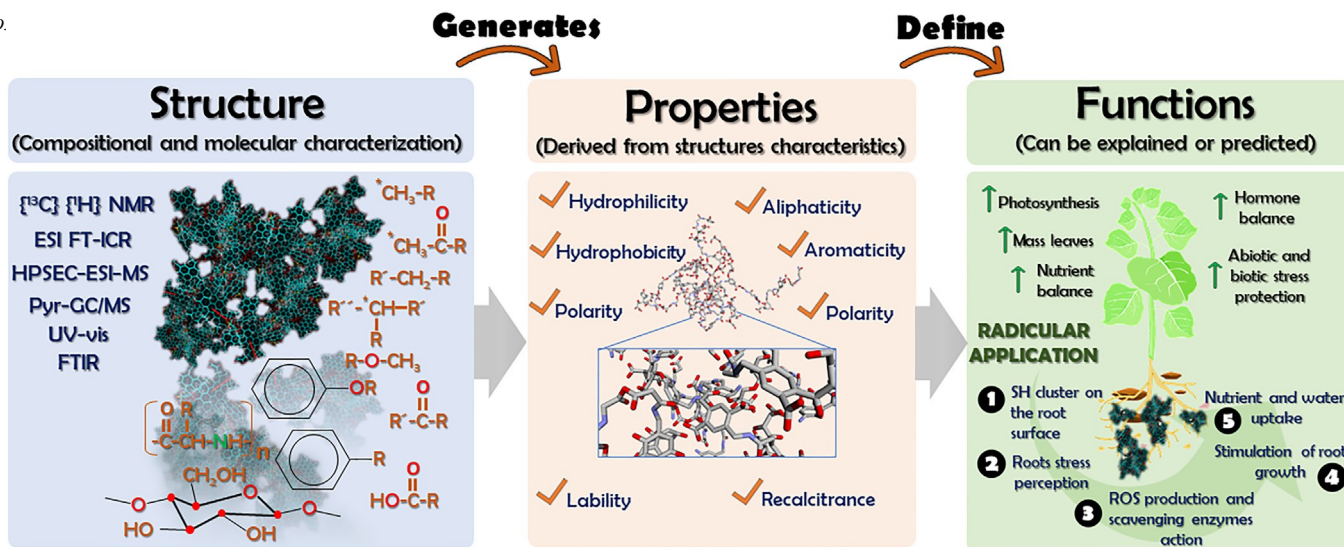


Fig. 3. Relation structure-propriété-fonction de l'effet des HS sur les plantes.

Tableau 1

Principales augmentations observées après l'application foliaire de substances humiques dans les cultures des différents groupes (% TSS = pourcentage de solides solubles totaux).

Groupe d'usines	Variabiles avec augmentations observées	Espèces	Références
Fruits	Hauteur de la plante, nombre de feuilles, poids moyen des fruits, nombre de fruits % OSH, rendement	Tomate, poivron, concombre, aubergine	de Hita et al, 2020 ; Azarpour, 2012 ; Karakurt et al, 2009 ; Olivares et al, 2015 Rachid et al, 2020 ; Raheem et al, 2018
Légumes-feuilles	Hauteur de la plante, Diamètre de la tige, Épi largeur, % Éléments nutritifs dans la feuille	Laitue, brocoli, chou-fleur	
Légumes-tubercules Nombre	Poids du bulbe, Piquant des dents, de feuilles, rendement en tubercules	Ail, oignon, pomme de terre	Balmori et al, 2019 ; Kandil et al, 2012 ; Man-hong et al, 2020
Graminées	Nombre de talles, Surface des racines, Indice de récolte, Rendement en grains	Riz, maïs, sorgho Blé	Anjum et al, 2011 ; Delfine et al, 2005 ; Felipe et al, 1998 ; Osman et al, 2013
Légumineuses	Hauteur de la plante, Nombre de gousses, Poids des graines, Rendement	Haricots, pois, soja	Basha et al, 2020 ; Kaya et al, 2005 ; Lenssen et al, 2019
Arbres fruitiers	Hauteur de la plante, diamètre de la tige, teneur en chlorophylle des feuilles, rendement en fruits	Raisin, goyave, mangue Fruit de la passion Tournesol, colza, sésame à la menthe,	Abdulhameed Ibrahim et Abdulali Al-Sereh, 2019 ; Cavalcante et al., 2013 ; El-Hoseiny et al., 2020 ; Ferrara et Brunetti, 2010 Deotale et al, 2019 ; Lotfi et al, 2015 ; Shahabivand et al, 2018 ; Shindhe et al, 2020
Graines oléagineuses surface foliaire, photosynthèse	Hauteur de la plante, rendement, % Huile dans les graines	Calendula, Chrysanthème, Glaïeul, Pétunia	Ahmad et al. 2013 ; BoogarI et al. 2014 ; Hasan, 2019 ; Mazhar et al. 2012 ^a
Ornementale	Nombre de fleurs, diamètre des fleurs, Durée de floraison, Durée de vie en pot		

De même, De Hita et al. (2020) ont étudié la distinction entre les effets de l'application sédimentaire d'AH sur les feuilles et sur les racines des plants de concombre (*Cucumis sativus* L. var. Ashley). Les auteurs ont trouvé d'importantes similitudes et différences entre les deux méthodes d'application de l'AH. Les deux formes d'application ont favorisé la croissance des pousses et des racines, avec des augmentations des concentrations d'IAA dans les racines et de cytokinines dans les pousses. Il a également été constaté que la pulvérisation foliaire à court terme réduisait le nombre de racines secondaires (contrairement à l'application sur les racines) et augmentait la longueur et la masse sèche des racines pivotantes. Les chercheurs ont expliqué ces résultats par la concentration dans les racines de deux phytohormones impliquées dans la régulation de la croissance des racines : IAA et l'acide abscissique (ABA). Alors que l'application sur les racines a augmenté les niveaux d'IAA et d'ABA, la pulvérisation foliaire n'a augmenté que les niveaux d'IAA. Bien que les teneurs en ABA des racines aient diminué avec l'apport foliaire d'AH, ce fait n'a pas affecté la croissance des racines, comme le prouve la production plus élevée de matière sèche, contrairement aux résultats d'Olaetxea et al. (2019), où l'application d'un inhibiteur de la biosynthèse de l'ABA a entravé le développement des racines de cette même variété de concombre. Par conséquent, De Hita et al. (2020) ont déclaré que d'autres facteurs doivent être impliqués dans les effets observés de l'application foliaire d'AH sur la croissance et l'architecture des racines. D'autre part, cette diminution des niveaux d'ABA dans les racines peut avoir été associée à la croissance des pousses après la pulvérisation foliaire.

Un autre point mis en évidence par De Hita et al. (2020) est que les traitements foliaires de l'eau de pluie sont plus efficaces que ceux de l'eau de mer.

L'application d'HA peut avoir déclenché des voies de signalisation, car l'interaction des composés humiques avec les surfaces foliaires ne se produit pas naturellement, ce qui peut inciter les plantes à percevoir cela comme un facteur de stress, activant des réseaux de signalisation tels qu'un mécanisme de défense. Dans ce cas, les plantes ont activé les voies de signalisation de l'acide salicylique et de l'acide jasmonique (JA). Les plantes traitées par voie foliaire ont montré une augmentation des niveaux de JA et de jasmonoyl isoleucine (JA-Ile), la forme active de l'hormone, dans les racines et les pousses, tandis que l'application racinaire de l'AH a augmenté le niveau de cette hormone uniquement dans les racines. Les auteurs

soulignent que ces changements hormonaux sont des symptômes liés au stress, associés à la perte des trichomes des feuilles et à la diminution de la taille des chloroplastes, ce qui réaffirme l'hypothèse selon laquelle les effets bénéfiques observés sont le résultat d'un stress léger et transitoire causé par l'application d'AH.

4.1. Application foliaire de HS dans les légumes

Les légumes sont des plantes herbacées ou sub-ligneuses, généralement cultivées de manière intensive sur des cycles courts, et ils sont habituellement cultivés dans de petits jardins potagers (Zárate et Vieira 2017). Ils sont des sources

Ils contiennent des vitamines, des fibres, des minéraux et d'autres composés bioactifs, et leur consommation est largement recommandée pour améliorer la santé humaine ; ils jouent également un rôle clé dans le renforcement de l'agriculture familiale (Faulin et Furquim De Azevedo 2003). Ce groupe de plantes peut être subdivisé en fonction des parties utilisées pour la consommation humaine ; par exemple, les parties comestibles des légumes tubéreux ou souterrains sont situées sous la surface du sol (pommes de terre, ignames, oignons, ail, ignames, manioc, betteraves, patates douces, carottes, etc.) ; les parties comestibles des légumes herbacés ou à feuilles se développent au-dessus de la surface du sol, avec des caractéristiques de succulence et de douceur (laitue, chou, épinard, etc.) ; et les parties comestibles des plantes fruitières sont les fruits verts ou mûrs (courge, tomate, concombre, melon, pastèque, poivron, etc.) (Camargo Junior et al, 2018). De nombreuses espèces de légumes ont une efficacité d'utilisation des nutriments relativement faible par rapport à celle d'autres cultures (Tei et al., 2020). Ce scénario entraîne une fertilisation excessive du sol, qui est alors affecté négativement (Zandonadi et al., 2014). Par conséquent, une agriculture plus durable basée sur des intrants organiques, y compris l'utilisation d'engrais foliaires à base de SH, peut être une solution. La laitue (*Lactuca sativa* L.) est l'une des espèces de légumes les plus étudiées en ce qui concerne l'application foliaire de SH. Wang et al. (2019) ont évalué la pulvérisation d'une solution contenant des AF à des concentrations de 0, 0,1, 0,3, 0,5, 1,0 et 2,0 g. L⁻¹ sur des plants de laitue soumis à un stress au cadmium (Cd). Les auteurs ont constaté que le traitement à l'AF atténuait les effets négatifs du stress au Cd de manière dose-dépendante, la dose intermédiaire de 0,5 g. L⁻¹ étant la plus efficace pour réduire l'accumulation de ce métal lourd dans les racines et les pousses des plantes. Une augmentation significative de la croissance des pousses et des racines, une plus grande protection de l'appareil photosynthétique, en particulier du photosystème deux (PSII), contre le stress du Cd, une réduction de l'accumulation des ROS et une augmentation de l'activité des enzymes antioxydantes, telles que l'ascorbate peroxydase (APX) et la CAT, ont été observées dans cette étude. Outre l'utilisation des HS pour protéger les plantes contre les stress abiotiques, de nombreuses autres études ont trouvé des améliorations dans plusieurs paramètres liés au développement des plants de laitue. Rodrigues et al. (2018) et Santos et al. (2018) ont observé que l'application d'AH provenant d'une source alternative et commerciale était bénéfique pour la croissance des plantules de laitue du cultivar Elba, et que les meilleures doses étaient de 3,0 mg. L⁻¹ (les deux sources d'AH) dans la première étude et 21,9 g. L⁻¹ de la source alternative et 7,3 g. L⁻¹ de la source commerciale dans la deuxième étude.

De leur côté, Hernandez et al. (2015) ont évalué l'application d'humate de potassium isolé du lombricompost de fumier de bovins directement sur les feuilles du cultivar de laitue Black Seed Simpson dans un système d'agriculture biologique urbaine à Cuba. Les humates ont été appliqués à des concentrations de 0, 10, 15, et 20 mg C. L⁻¹ à 10 et

15 jours après la transplantation. Les auteurs ont constaté que parmi les concentrations d'humate, la concentration de 15 mg C. L⁻¹ était la plus efficace pour augmenter le nombre de feuilles par plante, réduire les niveaux d'hydrates de carbone et augmenter la teneur en protéines et les activités des enzymes nitrate réductase (NR) et phénylalanine ammonia lyase (PAL), cette dernière étant fondamentale dans la synthèse des composés phénoliques qui agissent dans la défense des plantes contre les herbivores. Ils ont également émis l'hypothèse que les composés présents dans le complexe humifié pouvaient agir comme des inducteurs de l'activité de la PAL. Ces auteurs ont également souligné que l'application d'humates directement sur les feuilles activait leur métabolisme, accélérant le développement en réduisant le cycle de production, sans affecter la qualité commerciale des plantes, ce qui constitue un mécanisme possible pour améliorer l'agriculture urbaine. Outre la laitue, d'autres légumes-feuilles, tels que le brocoli (Al-Jaf et al., 2018), le chou-fleur (Rachid et al., 2020) et l'asperge (Tejada et Gonzalez 2003), ont également fait l'objet d'études sur l'application foliaire de SH, et tous les légumes ont présenté des réponses liées aux caractéristiques de développement.

Parmi les différents légumes, les tubéreuses ou plantes souterraines constituent un autre groupe qui a été largement étudié. Deux études récentes sur la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) ont montré que l'application foliaire de SH augmentait le rendement des tubercules (Man-hong et al., 2020 ; Wadas et Dziugiel 2020). Cependant, seule la première étude a montré une augmentation significative des niveaux de chlorophylle dans des conditions de stress hydrique lors d'une expérience contrôlée en serre. Les auteurs de la seconde étude n'ont pas constaté d'augmentation des teneurs en chlorophylle lors d'une expérience en plein champ sur un Luvisol et ont indiqué que ce paramètre dépendait du cultivar utilisé et des conditions climatiques et pédologiques. À leur tour, Dziugiel et Wadas (2020) ont réalisé une expérience similaire dans les mêmes conditions de terrain que l'étude susmentionnée des mêmes auteurs Wadas et Dziugiel (2020) au cours de trois années successives, où la léonardite HS (12 % HA et 6 % FA) a été pulvérisée deux fois (d'abord au stade du développement des feuilles, puis une semaine plus tard). Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas d'augmentation du nombre de tubercules par plante mais une augmentation du poids moyen des tubercules, ce qui s'est traduit par un rendement total et commercialisable plus élevé. En outre, ces chercheurs ont constaté que l'application de l'AH produisait de meilleurs résultats au cours de la saison de croissance la plus froide avec des pénuries d'eau périodiques qu'au cours de la saison de croissance la plus chaude pendant le développement de la pomme de terre, ce qui réaffirme l'effet des HS lié à la maîtrise du stress hydrique, par exemple, la réduction du taux de transpiration. D'autre part, Suh et al. (2014), évaluant la pulvérisation foliaire de FA plus l'application au sol de HA dans cette même culture, ont observé que le traitement direct sur le feuillage n'a pas affecté le nombre de tubercules ou leur rendement total et leur composition chimique. Cependant, dans cette expérience, il y a eu une augmentation du poids des tubercules extra-larges (plus de 250 g), augmentant l'incidence de la maladie du cœur creux, ce qui a conduit les auteurs à déclarer que dans les conditions évaluées, la pulvérisation d'AF n'est pas recommandée.

L'ail (*Allium sativum* L.) et l'oignon (*Allium cepa* L.) appartiennent à la famille des

du même genre et sont également classées comme légumes souterrains ou tubéreux. En outre, de nombreux rapports dans la littérature traitent de l'application foliaire de produits à base de SH sur ces espèces. En ce qui concerne l'ail, des études montrent à la fois une augmentation des niveaux de macro- et micronutriments, l'âcreté des gousses (Manas et al., 2014), le poids des bulbes, le rendement des gousses par bulbe et la

capacité de stockage (Abdel-Razzak et El-Sharkawy 2013). Balmori et al. (2019) ont évalué les effets de la pulvérisation d'un extrait humique liquide dérivé du lombricompost dans une expérience de terrain 45 jours après la plantation des graines d'ail. Les auteurs ont observé une augmentation de la masse externe des gousses d'ail, en plus des paramètres de qualité commerciale, et ils ont lié ces réponses à la structure du matériau humique appliqué, avec une prédominance de composés aliphatiques tels que les glucides, les peptides et les fragments de lignine plus labiles, qui conféraient le potentiel de bioactivité de l'HS appliqué. En ce qui concerne la culture de l'oignon, Kandil

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbarq, D. Franca de Oliveira, Torchia et al. et al. (2012) ont montré que la pulvérisation foliaire d'AH (4,76 L. ha⁻¹, deux fois, à 60 et 80 jours après la transplantation) a fourni les meilleurs résultats pour les traits liés à la croissance (hauteur de la plante, nombre de feuilles par plante, poids frais de la plante), proportion de feuillage et de bulbe), ainsi que le % de solides solubles totaux (SST), le poids du bulbe, et le rendement total et commercialisable du cultivar Giza 20. Ces réponses ont été attribuées à l'action des HS dans la stimulation de la croissance initiale des oignons, ainsi que dans la plus grande production de matière sèche et la synthèse de produits métaboliques qui sont transloqués dans les bulbes. Dans une tendance opposée, Osvalde et al. (2013) n'ont pas trouvé d'influence positive de la pulvérisation foliaire d'un SH dérivé du lombricompost (1,5 L. ha⁻¹, deux ou trois fois) sur les teneurs en nutriments et le rendement des oignons lors d'une expérience en plein champ en Lettonie. Ces résultats contrastés peuvent s'expliquer par la diversité de l'origine, de la composition et du dosage des SH appliqués, ainsi que par la variabilité de l'environnement et des cultivars étudiés.

En évaluant l'application foliaire de SH sur des carottes (*Daucus carota* L.), Alhariri et Boras (2020) ont constaté une augmentation significative de la croissance des plantes et du rendement en racines, avec une augmentation de la hauteur des plantes, de la masse fraîche des plantes, des feuilles et des racines, ainsi qu'un meilleur taux de récolte. Des effets positifs sur cette culture ont également été constatés par El-Helaly (2018), qui a testé la pulvérisation de HA (1 g.L⁻¹) et de FA (0,5 g.L⁻¹), les deux étant appliqués quatre fois (à 30, 45, 60 et 75 jours après l'ensemencement) sur quatre cultivars différents. En général, par rapport à l'AF, l'AH a été plus efficace pour augmenter le poids et le diamètre des racines, le rendement et l'indice de récolte, tandis que l'AF a été plus efficace pour augmenter le % de matière sèche, les hydrates de carbone totaux, les caroténoïdes totaux, l'azote et le phosphore dans les racines, ainsi que la teneur totale en chlorophylle des feuilles. La pulvérisation foliaire d'AF (10 mg. L⁻¹) sur la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) a augmenté le poids, le diamètre et la longueur des racines, le rapport racine/pousse et les rendements biologiques des racines, des pousses et du sucre, ainsi que les pourcentages de saccharose, de TSS et de pureté (Kandil et al., 2020). Outre ces paramètres, Abido et Ibrahim (2017), qui ont appliqué de l'AH (1,5 mg. L⁻¹, à 50 et 70 jours après le semis), parmi d'autres produits, ont également montré des niveaux plus élevés de chlorophylle dans la feuille, de surface foliaire et de longueur, ainsi que des taux de croissance foliaire relatifs et de culture plus élevés.

Dans le groupe des plantes fruitières, la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'une d'entre elles.

Les auteurs Villegas-Espinoza et al. (2018) ont testé dans une expérience de terrain l'application foliaire du produit Foliar Liplant. Les auteurs Villegas-Espinoza et al. (2018) ont testé dans une expérience de terrain l'application foliaire du produit Foliar Liplant®, avec 50% HA et 50% FA, à des dilutions de 1/10, 1/20, et 1/30 (v/v), pulvérisé à 10 et 25 jours après la transplantation des plants de tomates. Des augmentations ont été observées dans les paramètres suivants : hauteur des plantes, diamètre des tiges, nombre de fruits/plantes, diamètre des fruits polaires et équatoriaux, masse fraîche et sèche des fruits, % TSS, indice de maturité, vitamine C, bénéfice net et bénéfice du rapport des coûts, le traitement 1/30 donnant les meilleurs résultats. En outre, Reyes Perez et al. (2011), travaillant avec le même produit, les mêmes périodes d'application et des dilutions égales, en ajoutant 1/40 et 1/50 (v/v), n'ont pas observé d'amélioration significative des caractéristiques évaluées : pH, % TSS, acidité, vitamine C et acide malique. Oliveira Amatuzzi et al. (2020), en plus de la les variables mentionnées ci-dessus ont également observé des augmentations du poids frais et sec des racines, du volume des racines et de la longueur totale des racines et des racines fines. Ces auteurs ont effectué une pulvérisation foliaire de *Lithothamnium* sp, une algue calcaire micronisée contenant des AH, à des doses de 0, 0,75, 1,5, 2,25 et 3,0 g. L⁻¹, et la

Journal of the Science of Horticulture 2023, 5(1) 507

promotion de la croissance des pousses à des concentrations d'application plus élevées par rapport à celle des racines. Il a donc été constaté que ces algues peuvent être un autre matériau à base d'HS ayant des effets biostimulants potentiels sur les plantes.

Une question importante qui doit être abordée pour garantir une procédure d'application correcte de la fertilisation foliaire avec des biostimulants est le moment de l'application de la substance, qui doit se produire en fonction du stade de développement phénologique de la culture. Par exemple, Alfonso et al. (2010), où le produit à base de SH dérivé du lombricompost Biostan (25 mg. ha⁻¹) a été pulvérisé, il a été observé que dans les conditions expérimentales, il y avait un taux de croissance de la plante de 10 %.

Les chercheurs ont constaté que les deux meilleurs moments d'application pour la tomate étaient le début de la floraison et la floraison/fructification, ce qui a permis d'améliorer les niveaux de N, P et K dans les feuilles, les niveaux de nitrate dans les fruits, le nombre de fleurs et de fruits par plante, le % TSS et le rendement de la culture ($t. ha^{-1}$). De même, [AbdAllah et al. \(2018\)](#) ont constaté que la solution FA (0,15 et 0,20%) appliquée trois fois pendant la période de fructification était efficace pour agir sur la transpiration de pré-ventilation, augmentant l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les plants de tomates.

Un autre point intéressant concernant l'application foliaire des SH concerne leurs effets synergiques avec les bactéries favorisant la croissance des plantes. Par exemple, [Olivares et al. \(2015\)](#) ont observé une augmentation significative de la masse sèche des racines, des racines et des surfaces foliaires, ainsi que des niveaux de PAL, des enzymes de la nitrate réductase et de la teneur en protéines des feuilles de tomate après la pulvérisation foliaire d'humate dérivé du lombricompost de fumier de bovins ajouté à une suspension d'*Herbaspirillum seropedicae*, une bactérie diazotrophique endophyte. Ils ont également constaté que les effets combinés de l'application de HS et des bactéries à 15 et 30 jours après la transplantation favorisaient une plus grande croissance des plants de tomates, reflétant un meilleur rendement en fruits, et augmentaient la population fixatrice d'azote à la fois dans la région de la rhizosphère et dans les tissus racinaires et foliaires. Étant donné que les HS sont plus récalcitrants à l'activité microbienne que les autres produits, ils peuvent également être utilisés comme vecteurs de ces organismes bénéfiques dans l'agriculture. Ces résultats indiquent que le traitement avec des SH et des micro-organismes favorisant la croissance des plantes est un outil très utile pour accroître l'agriculture durable ([Canellas et al., 2015](#)).

En plus des études sur la tomate, plusieurs études sur d'autres fruits se sont concentrées sur l'effet des HS appliqués via le feuillage. Pour le concombre (*Cucumis sativus* L.), des rapports font état d'une augmentation de l'activité antioxydante des fruits, des fractions lipophiles et hydrophiles, des niveaux totaux de caroténoïdes et de xanthophylles, du lycopène, du B-carotène et de l'acide chlorogénique ([Karakurt et al., 2015](#)), ainsi que des augmentations de la hauteur des plantes, de la masse sèche, du nombre de feuilles/plantes, de la longueur, du diamètre et du poids moyens des fruits, de la teneur en chlorophylle, du % N, du % K, du % TSS et du rendement des fruits ([Kazemi 2013](#)). De leur côté, [Abdulbaset et Al-Madhagi \(2019\)](#) ont évalué la pulvérisation d'AH (0, 100 et 300 $mg. L^{-1}$) et d'extrait de levure (0, 2000 et 4000 $mg. L^{-1}$), appliqués seuls ou ensemble, sur des plants de concombre après un mois de culture, et ils ont observé une augmentation du taux de croissance mais une réduction de la teneur en chlorophylle (SPAD); en outre, le meilleur traitement d'AH était de 100 $mg. L^{-1}$. En plus de stimuler la croissance, [Kamel et al. \(2014\)](#) ont trouvé que l'application foliaire de FA, extrait du fumier de biogaz, (50, 75, et 150 $mg. L^{-1}$) était efficace à toutes les concentrations pour contrôler le mildiou et l'oïdium dans les plants de concombre, même plus que les fongicides. Dans la culture de l'aubergine (*Solanum melongena* L.), [Ebrahim Azarpour \(2012\)](#) a testé l'application foliaire de HA (0, 25 et 50 $mg. L^{-1}$) plus des engrais azotés minéraux et organiques appliqués au sol. Dans cette étude, en comparaison avec les autres, la dose de 50 $mg. L^{-1}$ HA a été la plus efficace pour améliorer le rendement en fruits ($t. ha^{-1}$), le nombre de fruits par m^2 , le nombre de branches/plantes, la hauteur des plantes (cm), la longueur et la largeur des fruits (cm). De nombreuses études sur la culture du poivron (*Capsicum annum* L.) ont indiqué une augmentation de la croissance (hauteur de la plante, nombre de fruits/plantes, nombre de branches/plantes, etc.) et du rendement ([Yasar Karakurt et al., 2009](#); [Fathima et Denesh 2013](#), [Jan et al., 2020](#)) (Fig. 4).

4.2. Application foliaire de SH sur les graminées

Les graminées (famille des Poaceae ou Gramineae) constituent l'une des plus grandes familles d'angiospermes, avec plus de dix mille espèces, et sont représentées par des plantes communément appelées graminées et bambous. Ce groupe de plantes revêt une grande importance pour l'homme, notamment en tant que source d'alimentation, comme en témoigne l'estimation actuelle selon laquelle environ 70 % des terres arables de la planète (soit 70 millions d'hectares) sont destinées à la culture de céréales (maïs, blé, avoine, riz, etc.).

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al.
En outre, les espèces de cette famille couvrent également le sol pour le protéger contre les processus d'érosion (Filgueiras 2021). Un autre aspect pertinent de l'utilisation des graminées, en plus de l'utilisation des espèces de légumineuses (famille des Fabaceae) comme plantes fourragères tropicales dans les pâturages, est leur capacité à servir de base alimentaire pour les ruminants, en tant que plantes pérennes capables de germer après la coupe et/ou le pâturage (Souza et al., 2018).

Le riz (*Oryza sativa* L.) est l'une des cultures les plus importantes au monde, car il sert de nourriture à plus de la moitié de la population mondiale et est essentiel au maintien de la sécurité alimentaire. Au cours des dernières décennies, la production mondiale de riz a augmenté de manière significative, en grande partie grâce à l'amélioration des technologies de culture (Fu et al., 2021). Il existe donc de nombreuses études sur la biofertilisation du riz par les SH. Les études réalisées par Osman et al. (2013) ont testé l'application foliaire d'AH, d'AF ou des deux (AH + AF) (5 g. L⁻¹) en addition à la fertilisation azotée avec de l'urée et de l'ammoniac anhydre appliqués au sol à 20 et 35 jours après le repiquage de Giza

101 plants de riz. On a constaté une augmentation du nombre de tiges/m² ; du poids de 1000 grains ; du rendement en grains et en paille ; des teneurs en N, P, K, nitrate et nitrite ; et de la rentabilité, les meilleures réponses ayant été obtenues par le traitement combiné HA + FA plus ammoniac anhydre. De leur côté, Hernández et al. (2018) ont évalué la pulvérisation foliaire d'HA dérivé du lombricompost de fumier de bovins (0, 30, 34 et 38 mg. L⁻¹) appliqué à raison de 3 mL/plante à 32 jours après la germination de deux cultivars de riz (Jucarito104 et IACuba-33) en phase de tallage actif dans des conditions de stress hydrique et d'absence de stress hydrique. Les auteurs ont observé des effets positifs de l'AH, comme en témoignent les augmentations de la hauteur des plantes, de la masse sèche des racines, de l'activité de l'enzyme peroxydase (POX) et des niveaux de protéines solubles totales dans les deux conditions hydriques. Les doses les plus élevées (34 et 38 mg. L⁻¹ d'HA) ont donné les meilleurs résultats. Les auteurs ont émis l'hypothèse que l'effet protecteur possible de l'AH contre le déficit hydrique pourrait se développer par le biais d'une action ABA-like de l'HS, qui imiterait l'action de cette hormone.

L'action protectrice des HS a également été observée chez le maïs (*Zea mays* L.), où l'application foliaire d'AF (1,5 mg. L⁻¹, 25 mL pulvérisés) sur des plantes soumises à un stress hydrique a amélioré la croissance et les caractéristiques physiologiques de ces plantes. Le malondialdéhyde (MDA) est un produit de la peroxydation des lipides (Anjum et al., 2011). Par ailleurs, Khaled et Fawy (2011) ont appliqué une solution d'AH par voie foliaire (0, 0,1 et 0,2%) et l'ont pulvérisée dans 5 L d'eau déionisée à 20 et 40 jours après l'émergence des semis de maïs, ainsi que l'application d'AH au sol (0, 2 et 4 g. kg⁻¹), et les deux situations ont augmenté le stress salin. Les deux formes d'AH ont atténué le stress salin, en augmentant le poids sec et les teneurs en macro- et micronutriments, en particulier à partir des doses les plus faibles (0,1 % par voie foliaire et 2 g. kg⁻¹ au sol) jusqu'aux doses les plus élevées, et les effets bénéfiques ont été réduits. Les travaux de Canellas et al. (2005) ont étudié l'influence de l'application foliaire d'AH avec la suspension d'*H. seropedicae* (50 mg. L⁻¹ et 450 L. ha⁻¹) dans des expériences de terrain et ont trouvé que la pulvérisation améliorait le rendement des grains (en particulier en période de sécheresse) et la biomasse des racines et des pousses.

En ce qui concerne le blé (*Triticum aestivum* L.), de nombreuses études ont également été réalisées.

ont évalué l'application foliaire de produits à base d'HS. Xudan (1986) a appliqué des solutions d'AF (0,01 et 0,05 %) à cette culture et a constaté une plus grande résistance au stress de la sécheresse chez les plantes traitées, réduisant la transpiration par une plus grande fermeture des stomates. De tels effets ont également été rapportés plus tard par Dziugiel et Wadas (2020) pour la culture de la pomme de terre, et ils ont observé une augmentation de l'eau, de la chlorophylle, de l'absorption de P, du

nombre de grains et du pourcentage de épis fertiles par rapport à ceux des plantes de blé non traitées. Dans une autre étude, de l'AH (0, 0,1 et 0,2 %) a été pulvérisé sur des feuilles de blé à 20 et 35 jours après l'émergence des semis dans 5 L d'eau déminéralisée et pulvérisé directement sur le sol (0, 1 et 2 g. kg⁻¹), les deux AH étant dérivés de la léonardite, et le sol de l'expérience présentait des conditions calcaires, avec l'ajout de quantités croissantes de chaux. Il a été observé que l'apport d'AH limitait la diminution du poids sec et de l'absorption des nutriments causée par l'excès de chaux appliqué (Katkat et al., 2009).

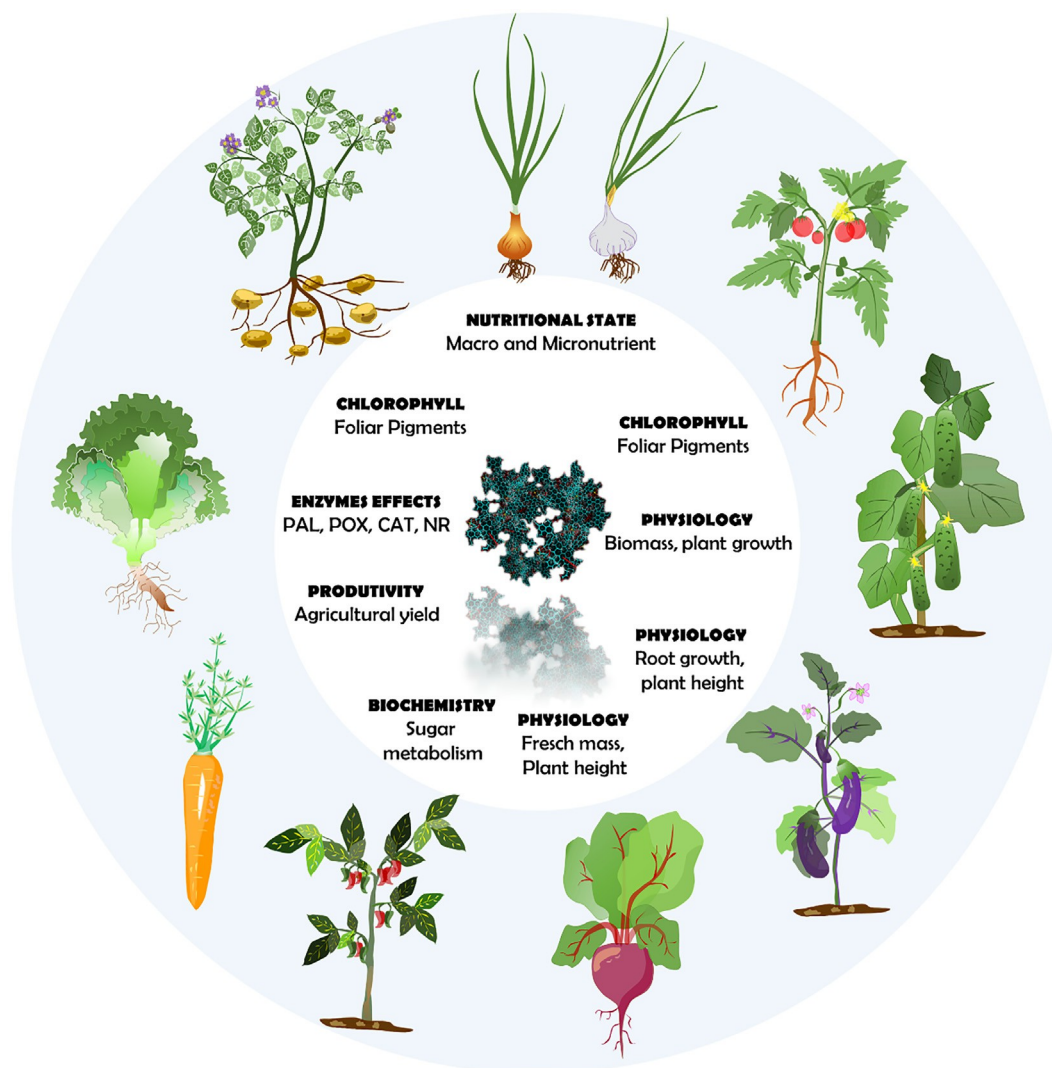


Fig. 4. Effets principaux de l'application foliaire de HS sur les légumes.

Des effets positifs de l'application foliaire d'une solution d'AF ont également été observés dans cette culture, à la fois en termes de biodisponibilité et de concentration plus élevées de zinc (Zn) dans les grains, avec la formulation liquide d'AF à 0,1% (m/v) (Wang et al., 2020), et une réduction de l'absorption et de l'accumulation de chrome (Cr), avec des activités plus élevées des enzymes antioxydantes, des niveaux de pigments photosynthétiques et de la biomasse végétale, après la pulvérisation aux stades du tallage et de l'initialisation avec une solution d'AF à 1,5 mg. L⁻¹ (Ali et al., 2015). Delfine et al. (2005) ont montré que, bien que l'application foliaire d'extrait humique ait amélioré certains paramètres du blé dur (*Triticum durum* L.), tels que le rendement en grains, le nombre de grains par épi, la teneur en protéines foliaires et autres, elle était moins efficace que l'application fractionnée d'azote au sol.

Dans Abdulsattar et Fahdawi (2020), l'effet de la pulvérisation foliaire d'un produit à base d'AH (0, 250, 500, et 750 mg. L⁻¹) sur l'orge (*Hordeum vulgare* L.) qui a été appliqué deux fois a montré des effets un mois après la plantation et au début de l'anthèse. Ces auteurs ont également utilisé différents espacements entre les rangs de culture. Il s'est avéré que l'application d'HA était utile dans les conditions de cette expérience, entraînant une augmentation du nombre d'épis/m², des grains/année, du rendement biologique et en grains et de l'indice de récolte, en plus d'une réduction du poids des grains. Dans l'ensemble, la dose intermédiaire de 500 mg. L⁻¹ a été

la plus efficace en combinaison avec un espacement de 15 cm entre les rangs. Essai de fertilisation foliaire HS dans l'avoine (*Avena*

O. Fioratti, Telles de Moura, R. Luiz, Louro, Barbara, D. França de Oliveira, Torchia et al., sativa L. cv. Shaffaa) dans le cadre d'une expérience en plein champ, aux stades du tallage et de la floraison à 50 %, Alabdulla (2019) a observé que les traitements à l'AH (0, 3, 6 et 9 g. L⁻¹) augmentaient le nombre de panicules/m², les grains/panicules, le % N, le %P, le %K et les protéines brutes sur la base de la matière sèche, ainsi que les rendements en grains et en fourrage, tout en réduisant le poids de 1 000 grains. Les périodes et les doses d'application ont eu une influence, et les meilleurs résultats ont été obtenus en pulvérisant au stade du tallage, où les meilleures doses étaient de 6 g. L⁻¹ pour le rendement en grains et de 9 g. L⁻¹ pour le % nutritionnel. Dans une autre étude, l'application foliaire d'un SH a été réalisée sur le sorgho (*Sorghum bicolor* L.), où le produit Humitron (0,125%) a été fourni deux fois, lorsque les plantes ont atteint 30 cm de hauteur et avant l'émergence des panicules, comme recommandé pour cette espèce, dans des conditions salines. Une amélioration de la croissance et du rendement du sorgho a été observée en fonction du SH, avec des augmentations de la hauteur des plantes, de la surface foliaire, du poids sec, du poids sec des panicules, de l'indice de récolte et du potentiel osmotique (Santoyo et al., 1998).

Outre les études sur les cultures céréalières, il existe également des rapports sur la pulvérisation foliaire de SH dans les graminées. Par exemple, Maibodi et al. (2015) ont testé l'influence d'un AH de léonardite (0, 100, 400 et 1000 mg. L⁻¹), pulvérisé mensuellement pendant 6 mois, sur le ray-grass vivace (*Lolium perenne* L.), une espèce fourragère hivernale. Les auteurs ont constaté que le SH augmentait les teneurs en N et en fer (Fe) dans les feuilles, ainsi que le diamètre, la longueur et la surface des racines sous un faible taux d'HA

En outre, la hauteur des plantes et la qualité visuelle sont meilleures lorsque les concentrations d'AH sont élevées, sans que la teneur en chlorophylle ne soit affectée. Des résultats similaires et différents ont été obtenus par Ervin et al. (2008) pour l'espèce *Poa pratensis* L. ("Kentucky Bluegrass"), une autre culture d'hiver pérenne, où de l'AH dérivé de la tourbe (47 g. m²) et de la léonardite (58 g. m²) a été appliqué sur les feuilles 6 (six) fois sur 12 (douze) semaines (une fois toutes les deux semaines), à un taux de 375

L. ha⁻¹, à Blacksburg, Virginie, USA, où règne un climat continental tempéré. Dans cette étude, les deux sources d'AH ont amélioré la résistance (kg. m³) et la masse racinaire (mg. m³) mais n'ont pas affecté la qualité visuelle, contrairement à une étude précédente sur le ray-grass vivace ou à une étude sur l'efficacité photochimique et la densité de tallage. Les chercheurs ont attribué cette absence d'effets à une plus grande sénescence des feuilles due à divers épisodes de gel au début de l'expérience.

A leur tour, Cooper et al. (1998) ont étudié l'espèce *Agrostis stolonifera* L. ("creeping bentgrass"), également une vivace d'hiver largement utilisée sur les terrains de golf car elle tolère des coupes proches du sol. Ces auteurs ont constaté que l'application foliaire d'AH dérivé du sol, de la tourbe, de la léonardite et d'un produit commercial soluble (100, 200 et 400 g. L⁻¹, pulvérisé 3 fois) avait des effets très limités par rapport à l'humate granulaire appliqué au sol, sans altérer la longueur et la masse des racines ou les contenus nutritionnels. Selon ces chercheurs, ces résultats sont dus au fait que les humates granulaires entrent en contact direct avec les racines, induisant ainsi une plus grande croissance des racines par rapport à l'AH appliqué directement sur les feuilles (Fig. 5).

4.2.1. Application foliaire de HS sur les légumineuses

Les légumineuses (famille des Fabacées) sont d'importantes sources de protéines, de phosphore et de calcium et jouent donc un rôle fondamental dans le régime alimentaire de milliers de personnes, en particulier dans les pays en développement (Desire et al., 2021). Les légumineuses comprennent de petites plantes (al-

falfa, pois, soja et trèfles), des arbustes (amarante, pois d'Angole) et des arbres, avec des fruits et des limbes légumineux (Fontaneli et al., 2009). En outre, la plupart des légumineuses sont capables d'établir une association mutualiste avec des rhizobias qui leur fournissent des photoassimilats et des nutriments et reçoivent de l'azote sous forme d'ammonium et d'acides aminés (Liu et al., 2018); ainsi, cette fixation biologique de l'azote (BNF) est une alternative à l'utilisation d'engrais azotés synthétiques, réduisant les émissions de gaz à effet de serre résultant du processus de production d'engrais, de son transport et de son application dans les cultures sur le terrain (Sant'Anna et al., 2018). Les légumineuses sont largement utilisées comme engrais vert dans les cultures ayant une plus grande demande de ce nutriment en raison de leur capacité à obtenir de l'azote biologiquement fixé (Zotarelli et al., 2012). En raison des avantages cités de ces cultures, de nombreuses études ont été menées pour évaluer leurs rendements, y compris par l'application foliaire de SH.

Les haricots (*Phaseolus vulgaris* L.) appartiennent à cette famille et ont des niveaux élevés de protéines, de fibres, de glucides complexes, d'acide folique, de fer, de zinc, de magnésium et de potassium (Ribeiro et al., 2011). Elkhatab et al. (2020) ont évalué les performances du haricot commun cv. Nebraska dans deux expériences de terrain en Egypte, après fertilisation foliaire avec HA (1 et 2 g. L⁻¹), FA (2,5 et 5 g. L⁻¹), et tryptophane, un précurseur physiologique de l'acide indoleacétique (0,5 et 1 g. L⁻¹), et tous ces produits ont été pulvérisés deux fois, 24 jours après l'ensemencement et au début de la floraison. Il a été constaté que tous les biostimulants augmentaient la hauteur des plantes, la masse fraîche et sèche du feuillage, le nombre de feuilles/plantes, la surface foliaire, le % N, le %P, le %K, la teneur en chlorophylle des feuilles, le nombre de gousses/plantes, la gousse/plante, le poids de la graine/plante et le rendement de la graine. Le tryptophane a donné les meilleurs résultats, suivi par l'AF et l'AH.

En travaillant avec l'application foliaire d'AF (0, 3, 6 et 9 g. L⁻¹) dans l'espèce de fève *Vicia faba* L. à 45 et 60 jours après le semis (phase d'élongation), Abdel-Baky et al. (2019) ont également observé des améliorations dans les paramètres de culture susmentionnés, avec

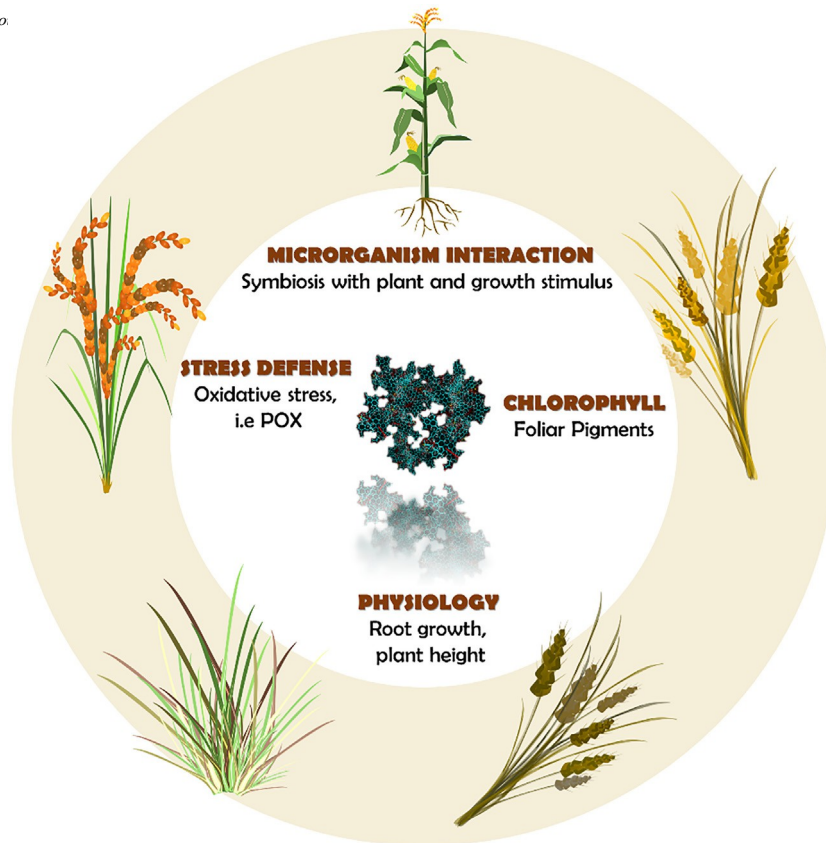


Fig. 5. Effets principaux de l'application foliaire de HS sur les graminées.

les réponses les plus élevées ont été obtenues à la plus forte dose d'AF (9 g. L⁻¹). Kaya et al. (2005) ont testé les effets de l'application foliaire d'un produit à base d'HS (à un taux de 2000 ml. ha⁻¹), du prétraitement des graines avec du zinc et d'une combinaison des deux traitements sur le haricot commun. La pulvérisation foliaire a été effectuée au stade de la troisième à la sixième feuille, la nuit, car pendant la journée, les températures élevées ont poussé les plantes à transpirer davantage au lieu d'absorber les nutriments. Les deux approches d'application seules n'ont pas eu d'effets significatifs, mais ensemble, elles ont permis d'augmenter des paramètres tels que la hauteur des plantes, le nombre de gousses/plante et le nombre de graines/plante, en plus du poids des graines/plante, ce qui indique un effet synergique entre les traitements.

De nombreuses autres cultures légumineuses d'intérêt économique ont déjà reçu une application foliaire d'HS. Par exemple, le soja (*Glycine max* L. Merr.) a été pulvérisé avec un produit humique commercial dérivé de la léonardite à quatre stades de son développement (végétatif : V2, V4 et V6 ; reproductif : R2, pleine floraison). Des expériences avec des tests de terrain ont été réalisées sur trois sites différents dans l'État de l'Iowa, aux États-Unis. La hauteur des plantes et la teneur en huile des graines n'ont été modifiées dans aucune expérience. La densité du peuplement, la teneur en protéines des graines et le rendement des cultures n'ont augmenté que dans certains endroits évalués (Lenssen et al., 2019). Pour la culture de pois (*Pisum sativum* L.) dans des conditions croissantes de stress salin, Basha et al. (2020) ont testé la fertilisation du sol avec du sulfate de potassium avec et sans application foliaire de HA (0,2%) appliquée trois fois (1, 3 et 5 semaines après la transplantation). Les auteurs ont constaté une amélioration des paramètres de croissance et de développement tels que la hauteur des plantes, la surface foliaire et le nombre de gousses/plantes, ainsi qu'une réduction des effets délétères de la salinité () sur les niveaux de chlorophylle *a*, *b* et de caroténoïdes.

En ce qui concerne les arachides (*Arachis hypogaea* L.), des études indiquent également une augmentation des rendements et de leurs composants en réponse à la pulvérisation foliaire de produits à base d'AH, seuls ou en combinaison avec d'autres produits ; une application du même produit sur le sol (avec un traitement foliaire à des taux de 1, 1,5, et 2% à 45 jours après le semis) ou sur la base de Teli et al. (2020) avec du phosphate de diammonium (DAP-2,0%) et un mélange de micronutriments (0,35%), avec un traitement foliaire de 0,3% d'AH pulvérisé à deux reprises (Reddy et al., 2020). Meena et al. (2018) ont étudié l'influence d'une pulvérisation foliaire de 15 % d'HA liquide (doses de 1,0, 1,5, 2,5 et 4,0 mL. L⁻¹) à 30, 60 et 90 jours après le semis de pois d'Angole (*Cajanus cajan* (L) Millsp.), a légumineuse arbustive. Des augmentations ont été observées dans des indices tels que la surface foliaire, le taux de croissance relatif, le taux d'assimilation net et la matière sèche totale, et les résultats ont augmenté avec le dosage de l'AH. Dans une autre étude portant sur la même espèce, l'application foliaire d'AH (1 mL. L⁻¹) a eu lieu une fois (30 jours après le semis) ou deux fois (à 30 et 45 jours après le semis), en plus d'autres traitements avec des applications au sol d'AH et de compost. En général, les meilleures réponses ont été obtenues avec la fertilisation du sol ; cependant, par rapport au contrôle, les apports foliaires d'AH (surtout appliqués deux fois) ont également permis d'augmenter des paramètres tels que la biomasse sèche, le nombre de gousses/plante et le rendement en graines (Nalia et Sengupta, 2019). De leur côté, Susithra et al. (2019) ont testé la pulvérisation foliaire d'HA (0,25 %) combinée à une dose recommandée d'engrais plus phosphobactéries appliquée au sol (2 kg. ha⁻¹). Les auteurs ont également observé des augmentations significatives des paramètres de croissance susmentionnés (Fig. 6).

4.2.2. Application foliaire de SH sur les arbres fruitiers

La production de fruits est un segment important de la production agricole mondiale. Le classement mondial des pays qui produisent le plus de fruits place la Chine en première position, suivie de l'Inde et du Brésil. Par exemple, la Chine contribue à 60 % de la production totale de fruits frais, principalement des pommes, des pêches, des poires, des bananes et des oranges (FAOSTAT, 2013). Au Brésil, la plupart de ces cultures fruitières sont permanentes, tandis que les principales plantes fruitières temporaires du pays sont l'ananas, le melon et la pastèque (Gerum et al., 2019).

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbara, D. França de Oliveira Torchia et al.

De la même manière que pour les autres groupes de plantes, les plantes fruitières font également l'objet d'études qui évaluent la bioactivité des matériaux humifiés, y compris la fertilisation foliaire des AH. Cavalcante et al. (2011) ont pulvérisé directement de l'AH dérivé de la léonardite à des taux de 0, 7,5, 15, 22,5 et 30 mL. m² à 15, 25 et 30 jours après avoir semé des papayes (*Carica papaya* L.) dans un abri couvert. Dans une étude ultérieure, le même groupe de recherche a évalué l'application foliaire du même produit sur le fruit de la passion jaune (*Pas- siflora edulis* Sims.) (Cavalcante et al., 2013). Pour les deux cultures, on a observé une augmentation de la hauteur des plantes, du diamètre des tiges, de la masse sèche des racines et des pousses, et des niveaux de chlorophylle dans les feuilles. Cette même équipe (Silva- Matos et al., 2012) a testé l'application foliaire du même produit et aux mêmes doses sur la pastèque (*Citrullus lanatus* L.) avec différentes périodes de fertilisation (à 10, 15 et 20 jours après le semis). Les analyses des variables ont été effectuées 25 jours après le semis et les augmentations observées des paramètres étaient les mêmes que celles indiquées dans les deux études précédentes, en plus des augmentations de la longueur et du volume des racines. Globalement, la dose la plus réactive est

22,5 mL. m², une réduction des effets bénéfiques étant observée avec la dose la plus élevée.

Ferrara et Brunetti (2010), travaillant avec une espèce de raisin de table (*Vitis vinifera* L. cv. "Itália"), ont effectué une application foliaire d'AH provenant du compost et du sol, à des concentrations de 5 et 20 mg. Ils ont constaté que les deux sources d'AH entraînaient une augmentation du rendement de la culture, de la taille des baies, de la teneur en chlorophylle, de l'azote dans les feuilles et les pétioles, et du % de MES, ainsi qu'une réduction de l'acidité titrable des fruits et un retard dans la dégradation de la chlorophylle. Dans un article ultérieur, ces mêmes auteurs ont testé l'application d'un AH extrait d'un échantillon de sol argileux (dose de 100 mg. L⁻¹) sur le même cultivar à quatre moments différents, préfloraison, pleine floraison, fructification et "véraison". Ils ont trouvé les mêmes réponses que celles de l'étude précédente et ont conclu que le traitement au stade phénologique de la pleine floraison montrait les plus grandes différences par rapport au contrôle (Ferrara et Brunetti 2010). Des rapports font également état de la pulvérisation de lombricompost HA (30, 40 et 50 mg. L⁻¹) sur le feuillage aux stades de la préfloraison et de la fructification de deux cultivars de raisin de cuve (*Vitis vinifera* cv. Feteasca Regala ; *Vitis vinifera* cv. Riesling Italian) dans le cadre d'une expérience en plein champ de deux ans menée en Roumanie. On a observé des rendements plus élevés (kg. de vigne⁻¹), des taux de photosynthèse, des teneurs en chlorophylle *a* et *b* et en caroténoïdes, une surface foliaire, une masse sèche et fraîche de feuilles, une masse et un volume de baies, ainsi qu'un % de MES et une acidité titrable plus faible. Dans les conditions de ces expériences, la dose intermédiaire de 40 mg. L⁻¹ a été la plus réactive (Popescu et Popescu 2018).

Des rendements plus élevés (kg. arbre⁻¹) ont été observés après l'application foliaire

(entre autres produits) d'une solution d'AH à des doses similaires dans les cultures suivantes : mangue (*Mangifera indica* L.) à des taux de 0,1, 0,2 et 0,3 % pulvérisés au stade de l'initiation des bourgeons floraux (Ngullie et al, 2014) et à 0,15, 0,3 et 0,45 % appliqués trois fois, deux fois avant et une fois pendant la floraison (El-Hoseiny et al., 2020) ; pêcher (*P. persica* L.) à 0,25 et 0,5 %, respectivement, après la fructification, répétés 4 fois à un intervalle de 15 jours (El-Razek et al., 2012) ; pomme à sucre (*Annona squamosa* L.), à 1 et 1,5 % (Sindha et al., 2018) ; pomme cajou (*Anacardium occidentale* L. à 0,5 %, répété trois fois aux stades précédant et suivant la poussée végétative et pendant la fructification (Dhanasekaran et al, 2018) ; kiwi (*A. Chev.*) CF Liang et AR Ferguson.) à 0,1 et 0,2 %, pulvérisé trois fois, avant l'anthèse, après la fructification et au stade du développement du fruit (Mahmoudi et al., 2014).

La culture du grandier (*Punica granatum* L.) avec la fertilisation foliaire HA (2 et 5 mg. L⁻¹), en plus des produits Kaolin (6%) et 3% calcium-1% bore (CB), tous appliqués seuls ou ensemble à 30 jours après la pleine floraison, a eu l'effet bénéfique de réduire le pourcentage de fruits fissurés et d'augmenter le poids des fruits (Ghanbarpour et al., 2019). Pour cette même culture, Sándor et al. (2015) ont observé des augmentations du diamètre des tiges, de la hauteur des plantes,

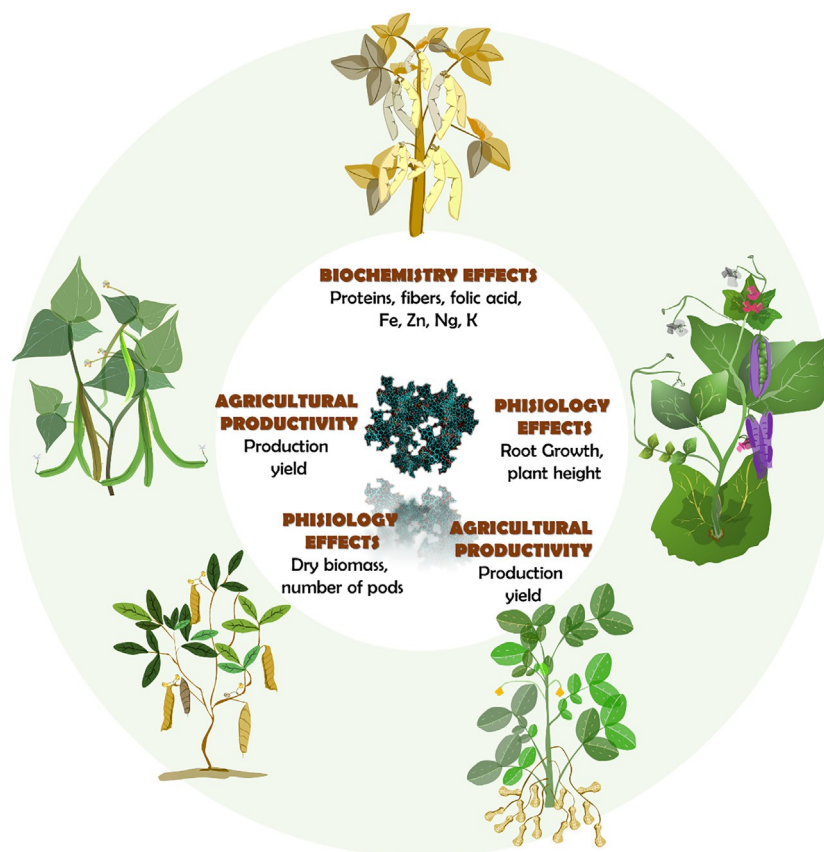


Fig. 6. Effets principaux de l'application foliaire de HS sur les légumineuses.

Le poids des plantes et le nombre de racines des plants de grenadiers traités avec de l'AF foliaire (10 L. ha^{-1} , 120 jours après la plantation des boutures dans les pépinières), en plus de l'AH sur le sol (100 kg. ha^{-1} , divisé en deux). Les avantages de l'AH ont également été observés dans la culture du goyavier (*Psidium guajava* L.), où la pulvérisation d'humate de potassium (0, 2 et 4 mg. L^{-1}) quatre fois, une fois par semaine, a entraîné une augmentation des différents paramètres évalués (hauteur, diamètre de la tige, nombre de pousses latérales et nombre de feuilles/plantules), ainsi qu'une réduction de la teneur en eau des feuilles, le traitement à 4 mg. L^{-1} étant le plus réactif (Abdulhameed Ibrahim et Abdulali Al-Sereh 2019).

Des applications foliaires et au sol d'AH ont également été comparées dans les cultures de pistachio (*Pistacia vera* L.) (40 L. ha^{-1} au sol ; $2,5 \text{ L. ha}^{-1}$ aux feuilles 3 mois après la plantation (Razavi Nasab et al, 2019) et les cultures d'abricot (*Prunus armeniaca* L.) (produit actosol, 2,9% HA : 0, 9, et 15 cm^3 sur les feuilles ; 0, 37,5. et 75 cm^3 dans le sol) (Fathy et al., 2010). Les deux études ont rapporté des augmentations des paramètres de croissance des espèces respectives ; cependant, pour les pistaches, l'application foliaire a été plus efficace, tandis que pour les abricots, le meilleur traitement a été celui du sol. Baldotto et al. (2011), travaillant sur l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill), ont pulvérisé du lombricompost HA (0, 10, 20 et 40 mmol. L^{-1}) plus du phosphate naturel, avec ou sans ajout d'acide citrique, à l'aisselle basale des feuilles. Des augmentations de la hauteur des plantes, de la longueur des plantes et de la largeur du tiers central de la feuille "D", du diamètre de la rosette et de la base, de la surface et du nombre des feuilles, ainsi que de la teneur en nutriments des pousses ont été observées (Fig. 7).

plantes médicinales

Les espèces qui ont la capacité d'accumuler des huiles dans leurs graines, en particulier des triacylglycérols, sont connues sous le nom d'oléagineux. Cette réserve de stockage est ensuite utilisée pour le développement des jeunes plants. Ces plantes sont fondamentales pour l'industrie agricole et sont utiles dans l'alimentation.

4.2.3. Application foliaire de HS sur les graines oléagineuses et les

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Barbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Les principales cultures de ce groupe sont le soja (déjà vu dans la section sur les légumineuses), le tournesol, le colza et l'huile de palme (Zafar et al., 2019). Les principales cultures de ce groupe sont le soja (voir la section sur les légumineuses), le tournesol, le colza et l'huile de palme (Zafar et al., 2019). À leur tour, les plantes médicinales jouent un rôle important dans la guérison de diverses maladies humaines, car elles contiennent des molécules bioactives telles que des alcaloïdes simples, des anthraquinones, des glycosides de naph-thopyrone, des composés phénoliques, des stéroïdes et des terpènes. Ces substances bioactives peuvent être synthétisées à la fois par les plantes et par un consortium microbien dans leurs tissus, et ces microbes, qui résident dans les plantes de manière asymptotique, sont connus sous le nom d'endophytes (Yadav et Meena 2021). Cette catégorie comprend, entre autres, les espèces suivantes : artichaut, romarin, camomille, fenouil, eucalyptus et gingembre (Argenta et al., 2011).

Thakur et al. (2017) ont évalué la pulvérisation foliaire de HA (stade bourgeon) et de FA + NPK (stade floral) sur le tournesol (*Helianthus annuus* L.), les deux produits étant pulvérisés à des doses de 0,5 et 1,0 %. En plus du traitement foliaire, des granulés d'AH (12,5 kg. ha⁻¹) + NPK ont également été appliqués au sol. On a constaté une augmentation des teneurs en N, P et K dans les graines, les tiges et le sol après la récolte, ainsi que dans les populations microbiennes du sol. L'AH appliqué au sol a donné les meilleurs résultats, mais il a été suivi de près par les traitements foliaires. Shindhe et al. (2020) ont testé des applications d'AH (4 ppm) et d'autres produits organiques (lombricompost et extraits de fumier de basse-cour, entre autres) sur le feuillage, en les comparant à une pulvérisation inorganique (0,1 % de bore), à de l'eau uniquement, et au contrôle (pas de pulvérisation). Les traitements ont été effectués 40 et 60 jours après l'ensemencement. Augmentation de la hauteur des plantes, du nombre de feuilles, de la surface foliaire, de la masse sèche des feuilles, de la masse sèche des tiges, du diamètre des têtes, du % d'akènes remplis, de l'indice de har- vèlement, du poids spécifique (g/100 graines) et des rendements en graines (g. plant⁻¹) et total (kg. ha⁻¹). Pour tous ces paramètres, l'AH a surpassé le contrôle et l'application avec de l'eau. Cependant, le traitement humique a été plus efficace que le contrôle et l'application avec de l'eau.

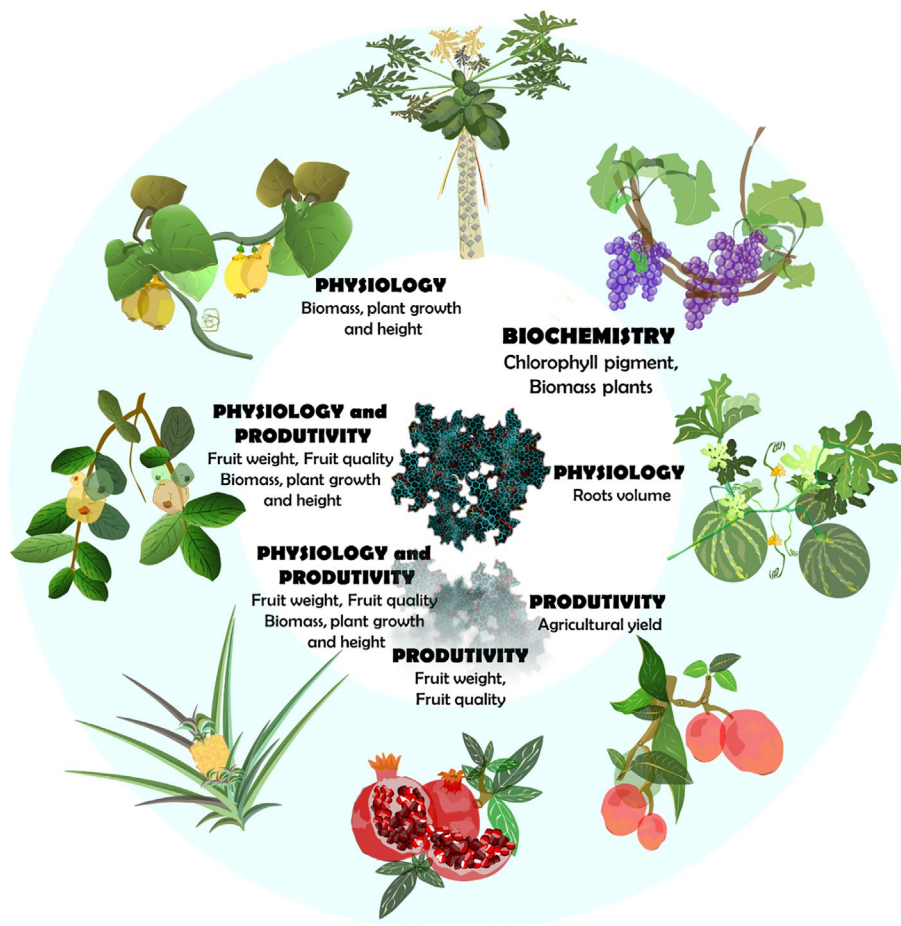


Fig. 7. Effets principaux de l'application foliaire de HS sur les arbres fruitiers.

L'utilisation d'un produit biologique n'a été supérieure à celle du bore qu'en termes de paramètres morphologiques et de croissance, et a été surpassée par la plupart des autres produits biologiques pour tous les caractères évalués.

Évaluant l'influence des HS sur le colza (*Brassica napus* L.), Lotfi et al. (2015) ont appliqué une solution d'AF (0, 300 et 600 mg. L⁻¹) sur des feuilles aux stades de croissance végétative et de floraison initiale dans des parcelles bien arrosées soumises à un stress hydrique modéré à sévère. Les auteurs ont rapporté que l'AF génère une augmentation des activités des enzymes antioxydantes (SOD, POD, APX et CAT), une réduction des niveaux de MDA et de la peroxydation lipidique des membranes, et une amélioration de l'appareil photosynthétique, avec une efficacité quantique supérieure à celle du photosystème deux (PSII). De leur côté, Amiri et al. (2020), étudiant cette même espèce, ont testé la pulvérisation foliaire du produit Humax 95 - WSG (80% HA et 15% AF) à 0,3% à deux stades, le stade 4-6 feuilles et la formation des bourgeons. Des rendements plus élevés en graines et en huile, des teneurs accrues en acides oléique et linoléique et des teneurs réduites en acide linoléique, en acide érucique et en glucosinolates ont été observés. Dans une culture de lin (*Linum usitatissimum* L.), Bakry et al. (2013) ont appliqué de l'AH (0 et 15 mg. L⁻¹) via les feuilles à 45 et 60 jours après le semis, en plus de la fertilisation organique du sol. Des augmentations de paramètres tels que la hauteur des plantes, la masse fraîche et sèche des racines et des pousses, la longueur des racines, le %TSS, les teneurs en polysaccharides, l'IAA, les phénols totaux et le rendement biologique, en graines, en huile et en % ont été observées. En ce qui concerne la culture des oliviers (*Olea europaea* L.), la fertilisation foliaire avec des HS a permis d'augmenter les teneurs en nutriments foliaires (Fernández-Escobar et al., 1996), la chlorophylle, les hydrates de carbone, les protéines,

les fibres et les matières grasses (Alshamlat et al., 2020).

Pour les espèces médicinales, il existe également de nombreuses études sur l'efficacité de l'application foliaire des HS. Chez le sésame (*Sesamum indicum* L.), l'augmentation des paramètres de croissance et du rendement en graines (Vani et al.),

O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbara, D. França de Oliveira Torchia et al. (2017) et les teneurs en N, P, K et chlorophylle des feuilles ainsi que le % d'huile de graine ont été observés (Deotale et al., 2019). Safaei et al. (2014) ont testé la fertilisation des feuilles de *nigelle* (*Nigella sativa* L.) avec le produit super humique (37% HA + FA, doses de 0, 1, 3 et 6 mg. L⁻¹), appliqué trois fois, en commençant au stade 8-10 feuilles et en continuant une fois toutes les deux semaines, jusqu'après la floraison. Les auteurs ont constaté une augmentation du nombre de capsules/plantes, du nombre de graines/capsules, du poids des graines/plantes, du rendement en graines et du rendement biologique, ainsi que de l'indice de récolte. En général, les doses les plus élevées (3 et 6 mg. L⁻¹) ont donné les meilleurs résultats. La menthe poivrée (*Mentha × piperita* L.) a reçu une application de HS sur le sol et les pousses, et dans ce dernier cas, une dose de 1,5 mg. L⁻¹ du produit (12% HA et 4% PA), quatre fois à 15 jours d'intervalle, a été appliquée à partir de 15 jours après la transplantation. Ces deux méthodes de fertilisation humique ont été combinées avec l'inoculation de champignons mycorhiziens à arbuscules (AMF) et l'ajout d'engrais chimiques. Les traitements aux HS ont augmenté les paramètres de croissance et de développement, ainsi que les TSS, les phénols solubles, les chlorophylles *a* et *b*, les caroténoïdes, l'amidon et les protéines solubles totales, ainsi que le pouvoir antioxydant. Une réduction de la colonisation des racines par les AMF a également été observée après les traitements humiques. Dans l'ensemble, l'application foliaire d'HS était plus efficace que l'application au sol et, associée à l'inoculation d'AMF, était plus bénéfique que la fertilisation chimique (Shahabivand et al., 2018). Des augmentations des caractéristiques liées à la croissance et au rendement des capitules et de l'huile de camomille (*Matri- caria chamomilla* L.) ont également été signalées après l'application foliaire d'AH (0, 50, 100 et 150 mg. L⁻¹) à 30 et 60 jours après le repiquage (Hassan et Fahmy 2020).

D'autres espèces de plantes médicinales ont également bénéficié d'un traitement foliaire.

fertilisation avec des HS ; par exemple, le *curcuma* (*Curcuma longa* L.) a reçu 0,1 % d'humate de potassium (31,8 % d'HA) à 90 et 120 jours.

après le semis et a augmenté son absorption de soufre (S) (Baskar et Sankaran 2004) ; le fenouil (*Foeniculum vulgare* Mill.), qui a également reçu de l'humate de potassium (0, 2, 3, 4 et 5 cm/L) 6 et 8 semaines après le semis, a augmenté ses paramètres de croissance végétative et la composition chimique de ses feuilles (El-Sawy et al, 2021) ; la stévia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) a reçu une pulvérisation de léonardite FA (500 mg. L⁻¹) une fois toutes les deux semaines après la transplantation, où, en plus des effets positifs sur la croissance, un pourcentage plus élevé de glycosides de stéviol (espèces sucrantes) et une réduction de la diversité de la communauté bactérienne endophyte, avec une plus grande présence de bactéries bénéfiques et un plus petit nombre de pathogènes potentiels ont été observés (Yu et al., 2015) ; le vinaigre/roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) a reçu une application foliaire d'humate de potassium 80% HA (0, 1, 2 et 3 g. L⁻¹) à 60, 75 et 90 jours après le semis (Amin et Kanimarani 2020) et une pulvérisation du produit Helpstar (12% HA) à 2 cm. L⁻¹ deux fois à un intervalle mensuel (Ahmed et al., 2011). Dans les deux études, les paramètres de croissance végétative se sont améliorés (Fig. 8).

4.2.4. Application foliaire de HS sur les plantes ornementales

Les plantes ornementales sont reconnues pour leurs fleurs, leurs formes, la couleur de leurs feuilles et d'autres aspects attrayants, contribuant ainsi à l'embellissement des environnements (Pereira et al., 2018). La floriculture est la production de fleurs à des fins commerciales, qui, bien que considérée par beaucoup comme une activité superflue,

sert des fonctions économiques et sociales, en créant des emplois et en assurant des fonctions culturelles et écologiques (Terra et Oliveira 2013).

Dans l'une des plus anciennes études sur la fertilisation foliaire avec des HS, Sladky (1959) a testé l'application d'HS sur des plants de bégonias (*Begonia semperflorens* Link et Otto) avec trois fractions humiques : extrait alcoolique, HA et FA (toutes à 100 mg/L). L'auteur de cette étude a constaté que l'AF était le composant humique qui donnait les meilleurs résultats, augmentant la hauteur des plantes, la masse sèche et fraîche des racines et des pousses, le taux de consommation d'oxygène et la teneur en chlorophylle des feuilles. Mazhar et al. (2012) ont évalué l'application foliaire d'humate de potassium (0, 1, 1,5 et 2,0 %) à deux reprises sur des cultures de chrysanthèmes (*Chrysanthemum indicum* L.) dans des conditions de stress salin croissant. Le traitement humique a augmenté la tolérance des plantes au stress salin, réduit les dommages et augmenté la hauteur des plantes, le diamètre des tiges, le nombre de branches/plantes, les racines et les pousses sèches et fraîches, le nombre de fleurs/plantes, la longueur des pédicelles, la masse des fleurs sèches et fraîches, et le % d'hydrates de carbone, de protéines, de N et de K. Le % de proline et de sodium (Na) a diminué, et la dose la plus élevée d'humate de potassium (2%) a généré les meilleures réponses de tous les traits évalués sous n'importe quel niveau de salinité. Fan et al. (2014) ont mené des expériences de pulvérisation d'AH dérivé de sédiments de résidus végétaux (1:600 (v/v)) dans une serre sur une autre espèce de chrysanthème (*Chrysanthemum morifolium* R.), qui a reçu des traitements à 15, 30, 45 et 60 jours après la transplantation. Outre les augmentations des paramètres morphologiques mentionnées dans l'étude précédente, les auteurs de cette étude ont constaté que le traitement était plus efficace que le traitement.

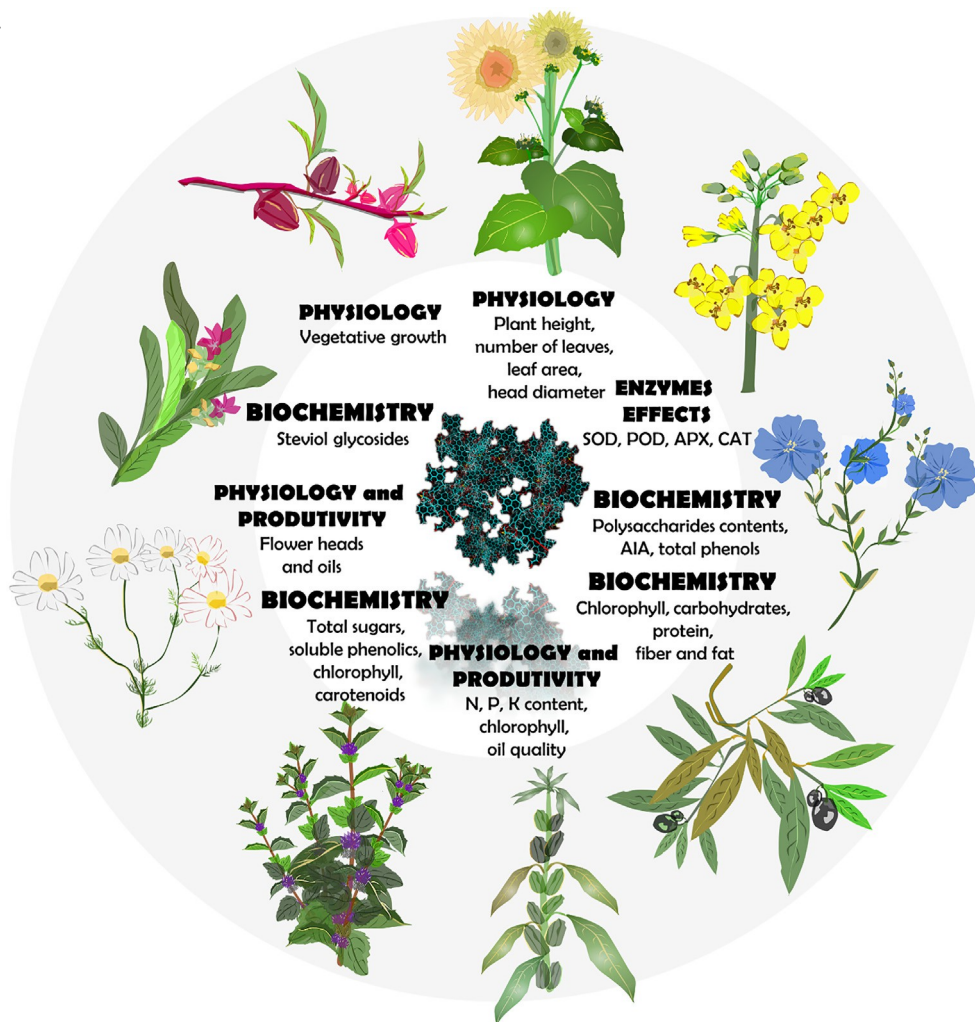


Fig. 8. Principaux effets de l'application foliaire de HS sur les graines oléagineuses et les plantes médicinales.

a fait état d'une augmentation de l'appareil photosynthétique des plantes avec l'application d'HA, comme le montre l'augmentation des taux de photosynthèse nette, de la fluorescence de la chlorophylle et de l'ultrastructure des chloroplastes.

Pour les soucis (*Calendula officinalis* L.), l'application foliaire d'HA a permis d'améliorer les caractéristiques morphologiques, en augmentant la longueur des feuilles, le nombre de fleurs/plante, ainsi que la largeur et la longueur des fleurs (Ahmad et al, 2019), le nombre de feuilles/plante, le nombre de branches principales et latérales/plante, la propagation des plantes (cm), la teneur en chlorophylle dans les feuilles, la masse sèche et fraîche des racines et des pousses, la longueur des racines, le nombre de jours d'inflorescence, le nombre d'inflorescences/plante, la longueur de la tige, le diamètre, le nombre de fleurs et la masse sèche et fraîche de l'inflorescence, et la durée de vie en vase (Hasan 2019). Pour le mari-or africain (*Tagetes erecta* L.), ces mêmes effets ont été observés avec la pulvérisation de sulfate d'HA et de zinc (tous deux à 0,2 %, à 30 et 45 jours après la plantation) combinée à l'apport de la dose recommandée de NPK par fertigation (Das et al., 2020).

Najarian, Souri et Nabigol (2022) ont rapporté que l'application d'AH, principalement à une dose de 250 mg L⁻¹, a bénéficié au développement de *Pelargonium × hortorum*, en augmentant la croissance végétative et les caractéristiques de floraison, telles que le nombre de feuilles, de pousses, de floraisons et de fleurs par plante. D'autres paramètres tels que la longueur et le diamètre des bourgeons floraux et la concentration des éléments minéraux foliaires ont également été favorisés. De leur côté, Boogar et al.

(2014), travaillant avec le pétunia (*Petunia hybrida* L.), ont observé que la pulvérisation de HA (0, 100, 300, 600 et 900 ppm) pendant deux stades de développement entraînait une augmentation de l'indice de surface foliaire, du nombre de tiges et de fleurs, de la teneur en eau relative et des niveaux foliaires de micronutriments (Fe, Zn, Cu et Mn), en plus des améliorations évoquées dans les espèces précédentes. Jawad et Majeed (2017) ont constaté une augmentation des paramètres morphologiques et de la durée de vie en vase du gerbera (*Gerbera jamesonii* L.) après l'application foliaire de HA (0, 5, 7,5 et 10 mg. L⁻¹) seul ou avec du chlorure de calcium à différentes concentrations. En général, la dose la plus élevée d'AH (10 mg. L⁻¹) associée aux quantités les plus élevées de chlorure de calcium a donné les meilleurs résultats. Dans une culture de glaïeul (*Gladiolus grandiflorus* L.), les effets de l'AH extrait de la léonardite appliqué au sol lors de la plantation ou directement sur le feuillage aux stades de 3 et 6 feuilles ajouté au sol ont été étudiés.

Cette triple combinaison a permis d'obtenir des réponses telles qu'un nombre élevé de feuilles/plantes, une surface foliaire, des teneurs en chlorophylle, une longueur de tige et d'épi et une durée de vie en pot, ainsi qu'une réduction de l'émergence des pousses (Fig. 9).

5. Conclusions

Le traitement foliaire avec des SH a le potentiel de générer des réponses positives dans les cultures les plus diverses de l'agriculture, de l'ornement et de l'élevage.

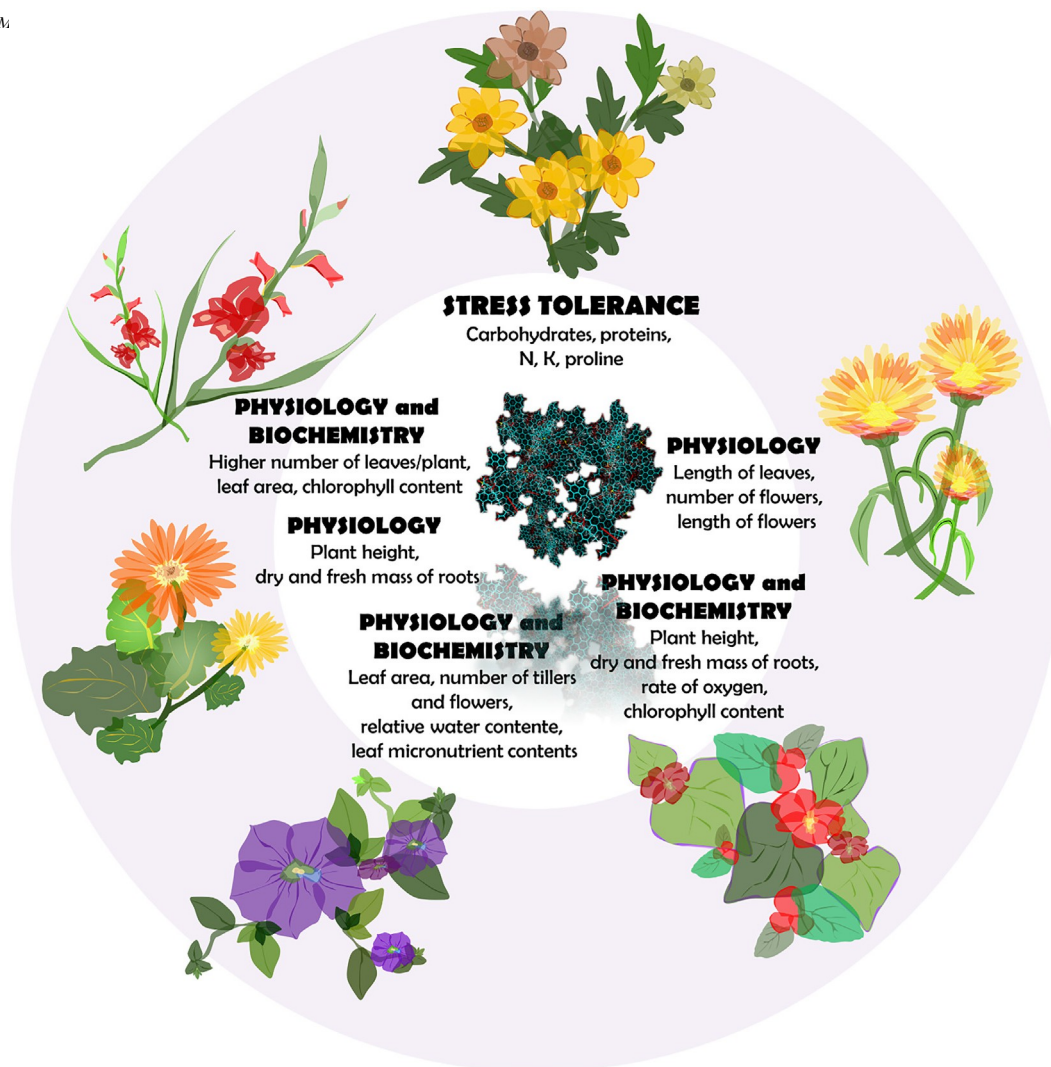


Fig. 9. Effets principaux de l'application foliaire de HS sur les plantes ornementales.

Les SH présentent un intérêt médicinal, en améliorant les paramètres de croissance et de développement, ainsi que les caractéristiques physiologiques et les réponses au stress. Cependant, en raison de la grande complexité structurelle des SH et du fait qu'ils sont dérivés de sources variées, leurs effets diffèrent, voire lorsqu'ils sont appliqués à la même espèce végétale. Ce scénario est dû à l'origine de la matière humique appliquée, à sa dose, au stade phénologique auquel la pulvérisation a lieu, au nombre d'applications, aux caractéristiques inhérentes à chaque espèce végétale et aux conditions expérimentales et environnementales de chaque lieu. Ainsi, il existe des études dans lesquelles les meilleurs résultats ont été obtenus avec les doses élevées d'HS, alors que dans d'autres études, les doses plus faibles d'HS ont été plus efficaces. Un autre point concerne les différences entre les traitements au sol et les traitements foliaires, avec des preuves que ces deux formes de fertilisation utilisent des mécanismes distincts qui aboutissent aux effets bénéfiques observés sur . Bien que les deux approches soient capables d'augmenter la production, certaines études ont montré que l'application au sol était plus efficace, tandis que d'autres études ont indiqué que la pulvérisation foliaire était meilleure, en plus des rapports faisant état d'une action complémentaire entre ces deux modalités. Par conséquent, compte tenu de ces informations, l'application foliaire de SH peut être utilisée comme une alternative pour des systèmes de production plus durables pour la plupart des espèces ayant une importance économique. Cependant, les spécificités de chaque situation considérée ici fournissent des informations pour aider à sélectionner de manière appropriée la meilleure façon de pulvériser ces matériaux, en visant un meilleur rapport coût-bénéfice pour ces activités.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont contribué de manière égale à la préparation, à la rédaction et à la révision du manuscrit ().

Déclaration d'intérêts concurrents

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu apparaître comme pouvant influencer le travail présenté dans cet article.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par la Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - Brésil (Grant no.SisFAPERJ : 2012028010), le Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brésil (CNPQ:No. 402396/2021-9 Universal 18/2021, CNPq-No. 309722/2021-7, PQ -2 Research grant). Programme de troisième cycle en agronomie - science du sol à l'université rurale fédérale de Rio de Janeiro (PPGA -CS, UFRRRJ) et Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. - Brésil (subvention n° CAPES:001).

Références

- AbdAllah, A.M., Burkey, K.O., Mashaheet, A.M., 2018. Réduction de la consommation d'eau des plantes par l'application foliaire d'anti-transpirants dans les plants de tomates (*Solanum lycopersicum* L.). *Sci. Hortic.* 235, 373-381. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.005>.
- Abdel-Baky, Y.R., Abouziena, H.F., Amin, A.A., Rashad El-Sh, M., Abd El-Sitar, A.M., 2019. Améliorer la qualité et la productivité de certains cultivars de féverole avec l'application foliaire de l'acide fulvique. *Bull. Georgian Acad. Sci. Natl. Res. Cent.* 43 (1). <https://doi.org/10.1186/s42269-018-0040-3>.
- Abdel-Razzak, H.S., El-Sharkawy, G.A., 2013. Effets des biofertilisants et des applications d'acide humique sur la croissance, le rendement, la qualité et la

- conservation de deux cultivars d'ail (*Allium sativum* L.). *Asian. J. Crop. Sci.* 5 (1), 48-64. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.48.64>.
- Abdulbaset, I., Al-Madhagi, H., 2019. Effet de l'acide humique et de la levure sur le rendement du concombre de serre. *J. hort. Postharvest Res.* 2 (1), 67-82. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2018.1773.1029>.
- Abdulhameed Ibrahim, M., Abdulali Al-Sereh, E., 2019. Effet de la pulvérisation foliaire avec de l'humate de potassium et de l'extrait de thé vert sur certaines des caractéristiques végétatives des plantules de goyave (*Psidium guajava* L. Cv. Local). *Plant Arch.* 19 (1), 404-408.

- Q. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbarq, D. Franca de Oliveira Torchia et al. Abdussattar, W., Fandawi, E., 2020. Effet de l'acide humique sur la croissance et le rendement de l'orge acide humique comme interagi avec le projet d'espacement des rangs. *Indian J. Ecol* 47, 62-65.
- Abido, W.A.E., Ibrahim, M.E.M., 2017. Rôle de la pulvérisation foliaire avec des substances biostimulantes dans la diminution de l'engrais azoté minéral de la betterave à sucre. *J. Plant Production Mansoura Univ.* 8, 1335-1343. <https://doi.org/10.21608/jpp.2017.41994>.
- Ahmad, S., Khan, J.A., Jamal, A., 2019. Réponse du souci en pot à différents niveaux appliqués d'acide humique. *J. Horticulture Plant Res.* 5, 57-60. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/jhpr.5.57>.
- Ahmad, I., Saquib, R.U., Qasim, M., Saleem, M., Khan, A.S., Yaseen, M., 2013. Humic acid and cultivar effects on growth, yield, vase life, and corm characteristics of gladiolus. *Chil. J. Agric. Res.* 73 (4), 339-344. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000400002>.
- Ahmed, Y.M., Shalaby, E.A., Shanan, N.T., 2011. L'utilisation de cultures organiques et inorganiques pour améliorer la croissance végétative, les caractères de rendement et l'activité antioxydante des plantes de roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Afr. J. Biotechnol.* 10 (11), 1988-1996. <https://doi.org/10.5897/AJB10.876>.
- Akladios, S.A., Mohamed, H.I., 2018. Effets amélioratifs du nitrate de calcium et de l'acide humique sur la croissance, la composante de rendement et l'attribut biochimique des plantes de poivre (*Capsicum annum*) cultivées sous le stress salin. *Sci. Hort.* 236, 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.047>.
- Alabdulla, S.A., 2019. Effet de l'application foliaire d'acide humique sur le fourrage et le rendement en grains de l'avoine (*Avena sativa* L.). *Crop. Res.* 20 (4), 880-885. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.130>.
- Albuzio, A., Nardi, S., Gulli, A., 1989. Plant growth regulator activity of small molecular size humic fractions. *Sci. Total Environ.* 81 (82), 671-674. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90176-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90176-9).
- Alfonso, E.T., Padrón, J.R., Diaz de Armas, M.M., 2010. Respuesta del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicon* L.) a la aplicación foliar de un bioestimulante derivado del Vermicompost. *Temas de Ciencia y Tecnología* 14 (41), 27-32.
- Alhariri, A., Boras, M., 2020. Responses of seed germination and yield related traits to seed pretreatment and foliar spray of humic and amino acids compounds in carrot (*Daucus carota* L.). *Int. J. Chem. Stud* 8 (4), 26-30. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4a.10338>.
- Ali, S., Bharwana, S.A., Rizwan, M., Farid, M., Kanwal, S., Ali, Q., Ibrahim, M., Gill, R.A., Khan, M.D., 2015. Fulvic acid mediates chromium (Cr) tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) through lowering of Cr uptake and improved antioxidant defense system. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22 (14), 10601-10609. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4271-7>.
- Al-Jaf, H.I., Raheem, S.M., Tofiq, G.K., 2018. Croissance et rendement du brocoli (*Brassica oleracea* L. Var. Corato) affectés par l'application d'acide humique. *J. Plant Production, Mansoura Univ.* 9, 739-741. <https://doi.org/10.21608/jpp.2018.36398>.
- Alshamlat, R.A., Makhoul Makhoul, G., Naddaf, M., Zidan, A., 2020. Effet de l'application foliaire d'acide humique et de l'élément, bore et zinc dans les composants de s feuilles d'olivier (variété khodeiry). *Int. J. Agric. Environ. Inf.* 7 (3), 9-16.
- Amador, H.V., Guridi Izquierdo, F., Padrón, V.V., 2018. Revisión bibliográfica las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales* 39 (4), 102-109.
- Amin, M.I.M., Kanimarani, S.M.S., 2020. Impact de l'application foliaire d'acide humique et du temps de mesure sur la croissance et la production de Roselle *Hibiscus sabdariffa*. *J. Agric. Sci.* 20 (1), 38-48.
- Amiri Forotaghe, Z., Souri, M.K., Ghanbari Jahromi, M., Mohammadi Torkashvandi, A., 2022. Influence of humic acid application on onion growth characteristics on the water deficit conditions. *J. Plant Nutr.* 45 (7), 1030-1040.
- Amiri, M., Rad, A.H.S., Valadabadi, A., Sayfzadeh, S., Zakerin, H., 2020. Response of rapeseed fatty acid composition to foliar application of humic acid under different plant densities. *Plant Soil Environ.* 66 (6), 303-308. <https://doi.org/10.17221/220/2020-PSE>.
- Anjum, S.A., X i e , X.-Y., Wang, L.-C., Saleem, M.F., Man, C., Lei, W., 2011. Réponses morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantes au stress de la sécheresse. *Afr. J. Agric. Res.* 6 (9), 2026-2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>.
- Argenta, S.C., Argenta, L.C., Giacomelli, S.R., Cezarotto, V.S., 2011. Plantas medicinais : cultura popular versus ciência medicinal plants : popular culture contre la science. *Vivências* 7, 51-60.
- Asli, S., Neumann, P.M., 2010. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development. *Plant Soil* 336 (1), 313-322. <https://doi.org/10.1007/s1104-010-0483-2>.
- Azarpour, E., 2012. Effets de la gestion de l'engrais azoté bio, minéral, sous pulvérisation foliaire d'acide humique sur le rendement en fruits et plusieurs traits de l'aubergine (*Solanum melongena* L.). *African J. Agric. Res.* 7 (7). <https://doi.org/10.5897/ajar11.1833>.
- Bakry, A.B., Sadak, S.h., Moamen, H.T., Abd El Lateef, E.M., 2013. Influence de l'acide humique et de l'engrais organique sur la croissance, les constituants chimiques, le rendement et la qualité de deux cultivars de lin cultivés sur des sols sableux récemment récupérés. *Int. J. Acad. Res.* 5 (5), 125-134. <https://doi.org/10.7813/2075-4124.2013/5-5/a.17>.
- Baldotto, M.A., Giro, V.B., Baldotto, L.E.B., Canellas, L.P., Velloso, A.C.X., 2011. Performance initiale de l'ananas et utilisation du phosphate naturel appliqué en combinaison avec des composés organiques à l'aisselle des feuilles. *Revista Ceres* 58 (3), 393-401. <https://doi.org/10.1590/s0034-737x2011000300021>.
- Balmori, D.M., Domínguez, C.Y.A., Carreras, C.R., Rebatos, S.M., Fariás, L.B.P., Izquierdo, F.G., Berbara, R.L.L., García, A.C., 2019. L'application foliaire de l'extrait liquide humique du lombricompost améliore la production d'ail (*Allium sativum* L.) et la qualité des fruits. *Int. J. Recycling Organic Waste Agric.* 8, 103-112. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0279-1>.
- Basha, D.M.A., Hellal, F., El-Sayed, S., 2020. Effects of potassium and humic acid on amelioration of soil salinity hazardous on pea plants. *Asian J. Soil Sci. Plant Nutr.* 1-10. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2019/v5i430073>.

- Baskar, K., Sankaran, K., 2004. Effect of lignite humic acid on available S and its uptake in turmeric. *Agropedology*. 14.
- Boldrin, P.F., Faquin, V., Ramos, S.J., Boldrin, K.V.F., Ávila, F.W., Guilherme, L.R.G., 2013. Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. *J. Food Compos. Anal.* 31 (2), 238-244. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.06.002>.
- Boogar, A.R., Shirmohammadi, E., Geikloo, A., 2014. Bulletin of environment, pharmacology and life sciences effect of humic acid application on qualitative characteristic and micronutrient status in *Petunia hybrid L.* *Env. Pharmacol. Life Sci.* 3, 15-19.
- Boussingault, J.B., 1868. Action deletere de la vapeur du mercure sur les plantes. *Agronomie* 4, 343-359.
- Brongiart, A., 1834. Sur l'epiderme des plantes. Nouvelles r'echerches sur lastructure de l'epiderm des v'eg'etaux. *Ann. Sci. Nat. (Bot)* 1, 65-71.
- Burkhardt, J., Basi, S., Pariyar, S., Hunsche, M., 2012. Stomatal penetration by aqueous solutions - an update involving leaf surface particles. *New Phytol.* 196 (3), 774-787. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04307.x>.
- Bustamante Eguiguren, S., Nguyen, H.A., Caldwell, A., Nolin, K.A., Wu, C.A., 2020. Convergence de la morphologie et de la chimie des trichomes glandulaires chez deux espèces de monkeyflower (*Mimulus*, Phrymaceae) de montagne. *Flora : Morphology, Distribution, Funct. Ecol. Plants* 265. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151567>.
- Camargo Junior, O. A., Brandão Junior, J. U. T., Santos, H. S., Freitas, P. S. L. de. 2018. Hortaliças-fruto : aspectos gerais e uma estimativa da produção científica. In : Hortaliças-fruto. pp. 23-35. EDUEM.
- Canellas, L.P., Ferreira Da Silva, S., Lopes Olivares, F., 2005. L'application foliaire d'Herbaspirillum seropedicae et d'acide humique augmente le rendement du maïs. *J. Food Agric. Environ.* 13, 146-153.
- Canellas, L.P., Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Jones, D.L., Nebbioso, A., Mazzei, P., Piccolo, A., 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Sci. Hortic.* 196, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>.
- Cavalcante, Í.H.L., da Silva, R.R.S., Albano, F.G., de Lima, F.N., Marques, A.S., 2011. Pulvérisation foliaire de substances humiques sur la production de plants de papaye (papaw). *J. Agron.* 10 (4), 118-122. <https://doi.org/10.3923/ja.2011.118.122>.
- Cavalcante, I.H.L., Silva-Matos, R.R.S., Albano, F.G., Silva Júnior, G.B., Silva, A.M., Costa, L.S., 2013. Pulvérisation foliaire de substances humiques sur la production de semis du fruit de la passion jaune. *J. Food Agric. Environ.* 11 (2), 301-304.
- Cha, J.Y., Kang, S.H., Ali, I., Lee, S.C., Ji, M.G., Jeong, S.Y., Shin, G.I., Kim, M.G., Jeon, J.R., Kim, W.Y., 2020. L'acide humique améliore la tolérance au stress thermique via l'activation transcriptionnelle des protéines de choc thermique chez *Arabidopsis*. *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71701-8>.
- Chen, Y., Aviad, T., 1990. Effets des substances humiques sur la croissance des plantes. In : MacCarthy, P. (Ed.), *Humic substances in soil and crop science : selected readings*. Madison, Wisconsin, pp. 161-186.
- Cooper, R.J., Liu, C., Fisher, D.S., 1998. Influence of humic substances on rooting and nutrient content of creeping bentgrass. *Crop Sci.* 38 (6), 1639-1644. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800060037x>.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C., Roupael, Y., 1er août. Substances biostimulantes pour l'agriculture durable : Origin, operating mechanisms and effects on cucurbits, leafy greens, and nightshade vegetables species. *Biomolecules*. <https://doi.org/10.3390/biom11081103>.
- da Silva Pereira, J., dos Santos Silva, D.L., da Silva, G.S., dos Santos Oliveira, D., 2018. Plantas ornamentais ocorrentes no município de aldeias altas, Maranhão, Brasil. *Acta Tecnológica* 13 (1), 79-93. <https://doi.org/10.35818/acta.v13i1.612>.
- Das, S., Rahman, F.H., Sengupta, T., Nag, K., 2020. Studies on the response of african marigold (*Tagetes erecta*) to npk, humic acid and zinc sulphate in red and lateritic soils of Jhargam district of west bengal. *Adv. Res.*
- de Aguiar, T.C., de Oliveira Torchia, D.F., de Castro, T.A.V.T., Tavares, O.C.H., de Abreu Lopes, S., da Silva, L.D.S., Castro, R.N., Berbara, R.L.L., Pereira, M.G., García, A.C., 2022. Spectroscopic-chemometric modeling of 80 humic acids confirms the structural pattern identity of humified organic matter despite different formation environments. *Sci. Total Environ.* 833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155133>.
- de Castro, T.A.V.T., Berbara, R.L.L., Tavares, O.C.H., da Graça Mello, D.F., Pereira, E.G., de Souza, C.D.C.B., Espinosa, L.M., García, A.C., 2021. Les acides humiques induisent un état d'eustress via la photosynthèse et le métabolisme de l'azote conduisant à une amélioration de la croissance des racines chez les plantes de riz. *Plant Physiol. Biochem.* 162, 171-184. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.043>.
- de Hita, D., Fuentes, M., Fernández, V., Zamarreño, A.M., Olaetxea, M., García-Mina, J. M., 2020. Discriminer l'action à court terme de l'application racinaire et foliaire d'acides humiques sur la croissance des plantes : rôle émergent de l'acide jasmonique. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00493>.
- de Souza, E.L., da Cruz, P.J.R., Bonfá, C.S., Magalhães, M.A., 2018. Plantas forrageiras para pastos de alta produtividade Bovinocultura, equideocultura, forragem, ovinocaprinocultura, produção. *Nutri Time* 15 (4), 8272-8284.
- del Amor, F.M., Cuadra-Crespo, P., 2011. Gas exchange and antioxidant response of sweet pepper to foliar urea spray as affected by ambient temperature. *Sci. Hortic.* 127 (3), 334-340. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.10.028>.
- Delfine, S., Tognetti, R., Desiderio, E., Alvino, A., 2005. Effet de l'application foliaire de N et d'acides humiques sur la croissance et le rendement du blé dur. *Agronomie* 25 (2), 183-191. <https://doi.org/10.1051/agro:2005017>.
- Demidchik, V., Shabala, S.N., Davies, J.M., 2007. Spatial variation in H₂O₂ response of *Arabidopsis thaliana* root epidermal Ca²⁺ flux and plasma membrane Ca²⁺ channels. *Plant J.* 49 (3), 377-386. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2006.02971.x>.
- Deotale, R.D., Guddhe, V.A., Kamdi, S.R., Patil, S.R., Madke, V.S., Baviskar, S.B., Meshram, M.P., 2019. Réponse de l'acide humique à travers le lavage du lombricompost et l'utilisation de l'acide humique.

- O. Fioratti Telles de Moura, R. Luiz Louro Berbara, D. Franca de Oliveira Torchia et al. naa sur les paramètres chimiques, biochimiques, de rendement et de contribution au rendement du sésame. *J. Soils Crops*.
- Desire, M.F., Blessing, M., Elijah, N., Ronald, M., Agather, K., Tapiwa, Z., Florence, M. R., George, N., 1er mars. Exploration du potentiel d'enrichissement alimentaire des légumineuses et oléagineux négligés pour améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle des communautés de petits exploitants agricoles : une étude systématique. *J. Agric. Food*. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100117>.
- Dhanasekaran, K., Elayaraja, D., Srinivasan, S., 2018. Effet de l'application foliaire d'acide humique enrichi en micronutriments et d'acide gibbéréllique sur le rendement des fruits et des noix de cajou. *JETIR 5 (5)*, 771-773.
- dos Santos, A.C.M., Rodrigues, L.U., de Andrade, C.A.O., da Carneiro, J.S., da Silva, R.R., 2018. Ácidos húmicos e nitrogênio na produção de mudas de alfaca. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada Nas Ciências Agrárias 11 (1)*. <https://doi.org/10.5935/paet.v11.n1.08>.
- Duan, D., Tong, J., Xu, Q., Dai, L., Ye, J., Wu, H., Xu, C., Shi, J., 2020. Mécanismes de régulation de l'acide humique sur le stress Pb chez le théier (*Camellia sinensis* L.). *Environ. Pollut.* 267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115546>.
- Dziugiel, T., Wadas, W., 2020. Possibilité d'augmenter le rendement des pommes de terre en début de culture avec l'application foliaire d'extraits d'algues et d'acides humiques. *J. Cent. Eur. Agric.* 21 (2), 300-310. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2576>.
- El-Helaly, M.A., 2018. Effet de l'application foliaire d'acides humiques et fulviques sur le rendement et ses composants de certains cultivars de carotte (*Daucus carota* L.). *J. Horticultural Sci. Ornamental Plants 10 (3)*, 159-166. <https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2018.159.166>.
- El-Hoseiny, H.M., Helaly, M.N., Elsheery, N.I., Alam-Eldein, S.M., 2020. Humic acid and boron to minimize the incidence of alternate bearing and improve the productivity and fruit quality of mango trees. *HortSci.* 55 (7), 1026-1037. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15053-20>.
- Elkhatib, H.A., Gabr, S.M., Roshdy, A.H., Kasi, R.S., 2020. Effets de différents taux de fertilisation azotée et de l'application foliaire d'acide humique, d'acide fulvique et de tryptophane sur la croissance, la productivité et la composition chimique des plantes de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.). *Alexandria Sci. Exchange J.* 41 (2), 191-204. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2020.93900>.
- El-Sawy, S.M., El-Bassiony, A.M., Fawzy, Z.F., Shedeed, S.I., 2021. Amélioration du rendement et des qualités physiques et chimiques des bulbes de fenouil doux par pulvérisation d'humate de potassium. *J. Horticultural Sci. Ornamental Plants 13 (3)*, 272-281. <https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2021.272.281>.
- Ervin, E.H., Zhang, X., Roberts, J.C., 2008. Improving root development with foliar humic acid applications during kentucky bluegrass sod establishment on sand. *Acta Hort 783*, 317-322.
- Eskandari, S., Sharifnabi, B., 2020. Le moment de la pulvérisation foliaire affecte l'efficacité du manganèse appliqué sur l'amélioration de la résistance du concombre à *Podosphaera fuliginea*. *Sci. Hortic.* 261. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108780>.
- Fageria, N.K., Filho, M.P.B., Moreira, A., Guimarães, C.M., 2009. Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.* 32 (6), 1044-1064. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>.
- Fan, H.M., Wang, X.W., Sun, X., Li, Y.Y., Sun, X.Z., Zheng, C.S.u., 2014. Effets de l'acide humique dérivé des sédiments sur la croissance, la photosynthèse et l'ultrastructure des chloroplastes chez le chrysanthème. *Sci. Hortic.* 177, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.010>.
- FAOSTAT, 2013. Base de données statistiques de l'organisation pour l'alimentation et l'agriculture. Disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.
- FAO, 2022. L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022. Repenser les politiques alimentaires et agricoles pour rendre les régimes alimentaires sains plus abordables. FAO, Rome.
- Fathima, P.S., Denesh, G.R., 2013. Influence de la pulvérisation d'acide humique sur la croissance et le rendement du piment (*Capsicum annum* L.). *International Journal of Agric. Sci.* 9 (2), 542-546. Fathy, M.A., Gabr, M.A., el Shall, S.A., 2010. Effect of Humic Acid Treatments on "Canino" Apricot Growth, Yield and Fruit Quality. *New York Sci. J.* 3 (12), 109-115.
- Faulin, E.J., Furquim De Azevedo, P., 2003. Distribuição de hortalças na agricultura familiar : uma análise das transações. *Informações Econômicas 22 (11)*, 24-37. Felipe, L., Santoyo, R., Alcántar González, G., Ortega Escobar, M., Estrada, A.E., Soto Hernández, M., García, S., 1998. Fertilización foliar orgánica e inorgánica y rendimiento de sorgo en condiciones de salinidad. *Terra 16 (3)*.
- Fernandez, V., Eichert, T., 2009. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves : current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization (absorption of solutés hydrophiles par les feuilles des plantes : état actuel des connaissances et perspectives de la fertilisation foliaire). *Crit. Rev. Plant Sci.* 28 (1-2), 36-68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>.
- Fernández, V., Sotiropoulos, T., Brown, P.H., 2013. Fertilisation foliaire : principes scientifiques et pratiques de terrain. Association internationale de l'industrie des engrais, Paris, pp. 1-144.
- Fernández-Escobar, R., Benlloch, M., Barranco, D., Duenas, A., Gutiérrez Ganán, J.A., 1996. Response of olive trees to folk application of humic substances extracted from leonardite. *Sci. Hortic.* 66, 191-200.
- Ferrara, G., Brunetti, G., 2010. Efectos de los tiempos de aplicación de un ácido húmico del suelo sobre la calidad de las bayas de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) cv Italia. *Span. J. Agric. Res.* 8 (3), 817-822. <https://doi.org/10.5424/1283>.
- Filgueiras, T.S., 2021. Gramíneas do cerrado. IBGE, Rio de Janeiro.
- Fischer, T., 2017. Les structures supramoléculaires humiques ont des surfaces polaires et des noyaux non polaires dans le sol natif. *Chemosphere 183*, 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.125>.
- Fontaneli, R.S., Pereira, H., Santos, D., Carlos Baier, A., 2009. Morfologia de leguminosas forrageiras. In : Fontaneli, R.S., Santos, H.P.F.R.S. (Eds.), Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul Brasileira. 1 ed. Embrapa Trigo, Passo Fundo. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 22 (2023) 1493-513*.
- Franke, W., 1967. Mécanismes de pénétration foliaire des solutions. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 18, 281-300.

- Froni, T., VanderWeide, J., Palliotti, A., Tombesi, S., Poni, S., Sabbatini, P., 2021. Foliar vs. soil application of *Ascophyllum nodosum* extracts to improve grapevine water stress tolerance. *Sci. Hortic.* 277. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109807>.
- Fu, Y., Zhong, X., Zeng, J., Liang, K., Pan, J., Xin, Y., Liu, Y., Hu, X., Peng, B., Chen, R., Hu, R., 2021. Improving grain yield, nitrogen use efficiency and radiation use efficiency by dense planting, with delayed and reduced nitrogen application, in double cropping rice in South China. *J. Integr. Agric.* 20 (2), 565-580. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63380-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63380-9).
- García, A. C., Castro, T. A. V. T., Berbara, R. L. L., Elias, S. S., Amaral Sobrinho, N. M. B., Pereira, M. G., Zonta, E., 2019. Revisão Sobre a Relação Estrutura-Função das Substâncias Húmicas e a sua Regulação do Metabolismo Oxidativo em Plantas Críticas. (Extrait de <http://rvq.sbq.org.br>).
- García, A.C., Santos, L.A., Izquierdo, F.G., Sperandio, M.V.L., Castro, R.N., Berbara, R.L. L., 2012. Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress. *Ecol. Eng.* 47, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2012.06.011>.
- García, A.C., Santos, L.A., de Souza, L.G.A., Tavares, O.C.H., Zonta, E., Gomes, E.T.M., García-Mina, J.M., Berbara, R.L.L., 2016. Les acides humiques du lombricompost modulent l'accumulation et le métabolisme des ROS dans les plantes de riz. *J. Plant Physiol.* 192, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.008>.
- Gerardin, T., Douthe, C., Flexas, J., Brendel, O., 2018. Ombrage et sécheresse de croissance conditions impactent fortement les réponses dynamiques des stomates aux variations d'irradiance chez *Nicotiana tabacum*. *Environ. Exp. Bot.* 153, 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.019>.
- Gerum, A.D.A., Santos, G.S., Santana, M.D.A., Souza, J.D.S., Cardoso, C.E.L., 2019. *Fruticultura Tropical : potenciais riscos e seus impactos. Cruz das Almas*, p. 128.
- Gerzabek, M.H., Aquino, A.J.A., Balboa, Y.I.E., Galicia-Andrés, E., Granc'ic, P., Oostenbrink, C., Petrov, D., Tunega, D., 2022. A contribution of molecular modeling to supramolecular structures in soil organic matter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 185 (1), 44-59. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100360>.
- Ghanbarpour, E., Rezaei, M., Lawson, S., 2019. Réduction de la fissuration dans les fruits de grenade après l'application foliaire d'acide humique, de calcium-bore et de kaolin pendant le stress hydrique. *Erwerbs-obstbau* 61 (1), 29-37. <https://doi.org/10.1007/s10341-018-0386-6>.
- Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., Farooq, M., 2021. Cadmium toxicity in plants : Impacts et stratégies de remédiation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.
- Hasan, A.M., 2019. Effet de l'application foliaire d'acide humique et de benzyladénine sur la croissance et la floraison du souci (*Calendula officinalis* L.). *J. Univ. Duhok* 22 (1), 69-77. <https://doi.org/10.26682/avuod.2019.22.1.7>.
- Hassan, H., Fahmy, A., 2020. Effet de la pulvérisation foliaire de proline et d'acide humique sur la productivité et la teneur en huile essentielle de la camomille sous différents taux d'engrais organiques dans un sol sablonneux. *J. Plant Product.* 11 (1), 71-77. <https://doi.org/10.21608/jpp.2020.79156>.
- Hatami, E., Shokouhian, A.A., Ghanbari, A.R., Naseri, L.A., 2018. Atténuation du stress salin dans les porte-greffes d'amandes à l'aide d'acide humique. *Sci. Hortic.* 237, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.034>.
- Hernandez, O.L., Calderín, A., Huelva, R., Martínez-Balmori, D., Guridi, F., Aguiar, N. O., Olivares, F.L., Pasqualoto Canellas, L., 2015. Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production. *Agronomy Sustain. Dev.* 35 (1). <https://doi.org/10.1007/s15393>.
- Hernández, R., Robles, C., Calderín, A., Guridi, F., Reynald, I.M., González, D., 2018. Efectos anti estrés de ácidos húmicos de vermicompost en dos cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales* 39 (2), 65-74.
- Huang, S., Wang, P., Yamaji, N., Ma, J.F., 2020. Juin 1La nutrition végétale pour la nutrition humaine : Hints from Rice Research and Future Perspectives. *Mol. Plant Cell Press.* <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.05.007>.
- Jan, J.A., Nabi, G., Khan, M., Ahmad, S., Shah, P.S., Hussain, S., Sehri, S., 2020. L'application foliaire d'acide humique améliore la croissance et le rendement des variétés de piment (*Capsicum annum* L.). *Pak. J. Agric. Res.* 33 (3). <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2020/33.3.461.472>.
- Jawad, R.M., Majeed, B.H., 2017. Caractères floraux du gerbera (*Gerbera jamesonii*) affectés par l'application foliaire d'acide humique et de chlorure de calcium. *Zagazig J. Agric. Res.* 44 (3).
- Jeffrey, C. E. 2007. La structure fine de la cuticule végétale. In : *Annual Plant Reviews*. Vol. 23, pp. 11-125. Wiley Blackwell.
- Jindo, K., Olivares, F.L., da Malcher, D.J., Sánchez-Monedero, M.A., Kempenaar, C., Canellas, L.P., 2020. Du laboratoire au terrain : rôle des substances humiques en plein champ et sous serre en tant que biostimulant et agent de biocontrôle. *Front. Plant Sci. Front Media S.A.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>.
- Jung, H., Kwon, S., Kim, J., Jeon, J., 2021. Quelles caractéristiques des substances humiques sont étudiées pour améliorer leur valeur agronomique ? *Molecules* 26 (700), 1-10. <https://doi.org/10.3390/molecules>.
- Kamel, S.M., Afifi, M.M.I., El-shoraky, F.S., El-Sawy, M.M., 2014. L'acide fulvique : un outil pour contrôler les oïdiums et les mildious dans les plants de concombre. *Int. J. Phytopathol.* 3 (2), 101-108. <https://doi.org/10.33687/phytopath.003.02.0866>.
- Kandil, E.E., Abdelsalam, N.R., el Aziz, A.A.A., Ali, H.M., Siddiqui, M.H., 2020. Efficacité du nanofertilisant, de l'acide fulvique et de l'engrais au bore sur le rendement et la qualité de la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.). *Sugar Tech* 22 (5), 782-791. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00837-8>.
- Kandil, A.A., Sharief, A.E., Fathalla, F.H., 2012. Onion yield as affected by foliar application with amino and humic acids under nitrogen fertilizer levels. *ESci J. Crop Product.* 02 (02), 62-72.
- Karakurt, Y., Unlu, H., Unlu, H., Padem, H., 2009. The influence of foliar and soil fertilization of humic acid on yield and quality of pepper. *Acta Agric. Scand. B. Soil Plant Sci.* 59 (3), 233-237. <https://doi.org/10.1080/09064710802022952>.
- Karakurt, Y., Ozdamar-Unlu, H., Unlu, H., Tongue, M., 2015. Antioxidant compounds and activity in cucumber fruit in response to foliar and soil humic acid application. *Eur. J. Hortic. Sci.* 80 (2), 76-80. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.2.5>.
- Katkat, A., Çelik, H., Turan, M.A., Asy'k, B.B., 2009. Effects of soil and foliar applications of humic substances on dry weight and mineral nutrients uptake of wheat under calcareous soil conditions. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 3 (2), 1266-1273.
- Kaya, M., Atak, M., Khawar, M., Çiftçi, C.Y., Özcan, S., 2005. Effet du traitement des semences avant le semis avec du zinc et de la pulvérisation foliaire d'acides humiques sur le rendement du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.). *Int. J. Agric. e Biol.* 7 (6), 875-878.
- Kaya, C., Şnbayram, M., Akram, N.A., Ashraf, M., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., 2020. Sulfur-enriched Leonardite and humic acid soil amendments enhance tolerance to drought and phosphorus deficiency stress in maize (*Zea mays* L.). *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62669-6>.
- Kazemi, M., 2013. Effet de l'application foliaire d'acide humique et de nitrate de potassium sur la croissance du concombre. *Env. Pharmacol. Life Sci* 2 (11), 3-06.
- Khaled, H., Fawy, H.A., 2011. Effet de différents niveaux d'acides humiques sur la teneur en nutriments, la croissance des plantes et les propriétés du sol dans des conditions de salinité. *Soil & Water Res.* 6 (1), 21-29.
- Khan, M.A., Asaf, S., Khan, A.L., Jan, R., Kang, S.M., Kim, K.M., Lee, I.J., 2020. Extending thermotolerance to tomato seedlings by inoculation with SA1 isolate of *Bacillus cereus* and comparison with exogenous humic acid application. *PLoS One* 15 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232228>.
- Khorasaninejad, S., Alizadeh Ahmadvadi, A., Hemmati, K., 2018. L'effet de l'acide humique sur les propriétés morphophysiolologiques et phytochimiques des feuilles d'*Echinacea purpurea* L. sous le stress du déficit hydrique. *Sci. Hortic.* 239, 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.015>.
- Kishor, M., Jayakumar, M., Gokavi, N., Mukharib, D.S., Raghuramulu, Y., Udayar Pillai, S., 2021. L'acide humique en application foliaire et au sol améliore la croissance, le rendement et la qualité du café (cv. C × R) dans les Ghats occidentaux de l'Inde. *J. Sci. Food Agric.* 101 (6), 2273-2283. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10848>.
- Kovalchuk, N.M., Simmons, M.J.H., 2021. Le mouillage et l'étalement médiés par les surfactants : progrès récents et applications. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 51. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.07.004>.
- Kritzinger, I., Lötze, E., 2019. Quantification des lenticelles dans les cultivars de prunes japonaises et leur effet sur la perméance totale de la peau du fruit. *Sci. Hortic.* 254, 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.082>.
- Leite, J.M., Pitumpe Arachchige, P.S., Ciampitti, I.A., Hettiarachchi, G.M., Maurmann, L., Trivelin, P.C.O., Prasad, P.V.V., Sunoj, S.V.J., 2020. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Heliyon* 6 (10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05100>.
- Lenssen, A.W., Oik, D.C., Dinnes, D.L., 2019. L'application d'un produit humique formulé peut augmenter le rendement du soja. *Crop, Forage & Turfgrass Manage.* 5 (1). <https://doi.org/10.2134/cfcm2018.07.0053>.
- Leventoglu, H., Erdal, I., 2014. Effet des niveaux élevés de substance humique sur la croissance et la concentration en nutriments du maïs dans des conditions calcaires. *J. Plant Nutr.* 37 (12), 2074-2084. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920373>.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimah, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D., Henry, K., Hottle, R., Jackson, H., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeld, H., Remington, T., Sen, P.T., Sessa, R., Shula, R., Tibu, A., Torquebiau, E.F., 2014. Climate-smart agriculture for food security (Agriculture intelligente face au climat pour la sécurité alimentaire). *Nature Climate Change* 4, 1068-1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>.
- Liu, A., Contador, C.A., Fan, K., Lam, H.M., 2018. Interaction et régulation des métabolismes du carbone, de l'azote et du phosphore dans les nodules racinaires des légumineuses. *Plant Sci. Front. Media S.A.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01860>.
- Lotfi, R., Pessaraki, M., Gharavi-Kouchebagh, P., Khoshvaghti, H., 2015. Réponses physiologiques de *Brassica napus* à l'acide fulvique en cas de stress hydrique : Chlorophylle a fluorescence et activité enzymatique antioxydante. *Crop J.* 3 (5), 434-439. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.05.006>.
- Mahmoudi, M., Samavat, S., Mostafavi, M., Khalighi, A., Cherati, A., 2014. Les effets de l'acide humique et de la proline sur les propriétés morphologiques d'*Actinidia Deliciosa* cv. Hayward sous salinité. *J. Appl. Sci. Agric.* 9 (1), 261-267.
- Maibodi, N.D.H., Kafi, M., Nikbakht, A., Rejali, F., 2015. Effet des applications foliaires d'acide humique sur la croissance, la qualité visuelle, la teneur en nutriments et les paramètres racinaires du ray-grass pérenne (*Lolium Perenne* L.). *J. Plant Nutr.* 38 (2), 224-236. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.939759>.
- Manas, D., Soumya, G., Kheyali, S., 2014. Effet de l'application de l'acide humique sur l'accumulation de la nutrition minérale et le piquant dans l'ail (*Allium sativum* L.). *Int. J. Biotechnol. Mol. Biol. Res.* 5 (2), 7-12. <https://doi.org/10.5897/ijbmr2014.0186>.
- Man-hong, Y., Lei, Z., Sheng-tao, X., McLaughlin, N.B., Jing-hui, L., 2020. Effet de l'acide humique hydrosoluble appliqué au feuillage de la pomme de terre sur la croissance des plantes, les caractéristiques de la photosynthèse et le rendement en tubercules frais sous différents déficits hydriques. *Sci. Rep.* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63925-5>.
- Mazhar, A.A.M., Shedeed, S.I., Abdel-Aziz, M.G., Mahgoub, M.H., 2012. Growth, flowering and chemical constituents of *Chrysanthemum indicum* L. Plant in response to different levels of humic acid and salinity (Croissance, floraison et composants chimiques de la plante *Chrysanthemum indicum* L. en réponse à

- Meena, M.K., Dhanoji, M.M., Chandra Naik, M., 2018. Influence de la pulvérisation foliaire d'acide humique sur les indices physiologiques de croissance chez le Redgram (*Cajanus cajan*). *Pharmacologie et sciences de la vie Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, 57-63.
- Merget, A., 1873. Sur des phénomènes de thermodiffusion gazeuse qui se produisent dans les feuilles et sur les mouvements circulatoires qui en résultent dans l'acte de la respiration chlorophyllienne. *Compt. Rend. Acad. Sci.* 77, 1468-1472.
- Mocellin, R. S. P. 2004. Princípios das adubações foliares. Canoas.
- Monda, H., Cozzolino, V., Vinci, G., Drosos, M., Savy, D., Piccolo, A., 2018. Molecular composition of the Humeome extracted from different green composts and their biostimulation on early growth of maize. *Plant and Soil* 429 (1-2), 407-424. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3642-5>.
- Monda, H., McKenna, A.M., Fountain, R., Lamar, R.T., 2021. Bioactivité des acides humiques extraits du minerai de schiste : Molecular Characterization and Structure-Activity Relationship With Tomato Plant Yield Under Nutritional Stress. *Front. Plant Sci.* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.660224>.
- Muscolo, A., Sidari, M., Nardi, S., 2013. Humic substance : Relationship between structure and activity. deeper information suggests univocal findings. *J. Geochem. Explor.* 129, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.012>.
- Nachtigall, G.R., Nava, G., 2010. Adubação foliar : Fatos e mitos. *Agropecuária Catarinense* 23 (2), 87-97.
- Najarian, A., Soury, M.K., Nabigol, A., 2022. Influence of humic substance on vegetative growth, flowering and leaf mineral elements of *Pelargonium x hortorum*. *J. Plant Nutr.* 45 (1), 107-112.
- Nardi, S., Panuccio, M.R., Abenavoli, M.R., Muscolo, A., 1994. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. Rosea*. *Soil Biol. Biochem* 26 (10), 1341-1346.
- Nardi, S., Concheri, G., Pizzeghello, D., Sturaro, A., Rella, R., Parvoli, G., 2000a. Soil organic matter mobilization by root exudates. *Chemosphere* 41, 653-658.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Remiero, F., Rascio, N., 2000b. Chemical and biochemical properties of humic substances isolated from forest soils and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 (2), 639-645. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642639x>.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Ertani, A., 2018. Activité hormonale de la matière organique du sol. *Appl. Soil Ecol.* 123, 517-520. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.04.020>.
- Nardi, S., Schiavon, M., Francioso, O., 2021. La structure chimique et l'activité biologique des substances humiques définissent leur rôle en tant que promoteurs de la croissance des plantes. *Molecules* MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>.
- Nebbioso, A., Piccolo, A., Lamshöft, M., Spiteller, M., 2014. Molecular characterization of an end-residue of humeomies applied to a soil humic acid. *RSC Adv.* 4 (45), 23658-23665. <https://doi.org/10.1039/c4ra01619j>.
- Ngullie, C.R., Tank, R.V., Bhandari, D.R., 2014. Effet de l'acide salicylique et de l'acide humique sur la floraison, la fructification, le rendement et la qualité de la mangue (*Mangifera indica* L.) cv. Kesar. *Adv. Res. J. Crop Improvement* 5 (2), 136-139. <https://doi.org/10.15740/has/arjci/5.2/136-139>.
- O'Donnell, R.W., 1972. The auxin-like effects of humic preparations from leonardite. *Soil Sci.* 116 (2), 106-112.
- Olaetxea, M., de Hita, D., Garcia, C.A., Fuentes, M., Baigorri, R., Mora, V., Garnica, M., Urrutia, O., Erro, J., Zamarreño, A.M., Barbara, R.L., Garcia-Mina, J.M., 2018. Cadre hypothétique intégrant les principaux mécanismes impliqués dans l'action promotrice des substances humiques rhizosphériques sur la croissance des racines et des pousses des plantes. *Appl. Soil Ecol.* 123, 521-537. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.007>.
- Olaetxea, M., Mora, V., Bacaicoa, E., Baigorri, R., Garnica, M., Fuentes, M., Zamarreño, A.M., Spichal, L., Garcia-Mina, J.M., 2019. L'ABA racinaire et la H⁺-ATPase sont des acteurs clés dans l'action de promotion de la croissance des racines et des pousses des acides humiques. *Plant Direct* 3 (10). <https://doi.org/10.1002/pld3.175>.
- Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Rosa, R.C.C., Canellas, L.P., 2015. La biofortification du substrat en combinaison avec des pulvérisations foliaires de bactéries favorisant la croissance des plantes et de substances humiques stimule la production de tomates biologiques. *Sci. Hort.* 183 (1), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.012>.
- Oliveira Amatuzzi, J., Francisco Mógor, Á., Mógor, G., Bochetti de Lara, G., 2020. Novel use of calcareous algae as a plant biostimulant. *J. Appl. Phycol.* 32, 2023-2030. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02077-5> / Published.
- Olk, D.C., Dinnes, D.L., Rene Scoresby, J., Callaway, C.R., Darlington, J.W., 2018. Les produits humiques dans l'agriculture : avantages potentiels et défis de la recherche - une revue. *J. Soil. Sediment.* 18 (8), 2881-2891. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1916-4>.
- Osman, E.A.M., El-Masry, A.A., Khatib, K.A., 2013. Effet des sources d'engrais azotés et de la pulvérisation foliaire d'acides humiques et/ou fulviques sur le rendement et la qualité des plants de riz. *Pelagia Res. Library Adv. Appl. Sci. Res.* 4 (4), 174-183.
- Osvalde, A., Karlsons, A., Čekstere, G., Maļeckā, S., 2013. Effet des substances humiques sur l'état des nutriments et le rendement de l'oignon (*Allium Cepa* L.) dans des conditions de terrain. In : Actes de l'Académie des sciences de Lettonie. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences, 66(4-5), 192-199. doi : 10.2478/v10046-012-0028-6.
- Ozfidan-Konakci, C., Yildiztugay, E., Bahtiyar, M., Kucukoduk, M., 2018. Les changements induits par l'acide humique dans l'état de l'eau, la fluorescence de la chlorophylle et les systèmes de défense antioxydants des feuilles de blé avec le stress du cadmium. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 155, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.071>.
- Perminova, I., García-Mina, J.M., Knicker, H., Miano, T., 2019. Substances humiques et technologies proches de la nature : Apprendre de la nature : comprendre les structures et les interactions des substances humiques pour le développement de technologies respectueuses de l'environnement et similaires à la nature. *J. Soil. Sediment.* 19 (6), 2663-2664. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02330-6>.

- Q. Vioratti, Telles de Moura, R. Luiz Louro, Barbara, D. Franca de Oliveira, Torchia et al., Piccolo, A., 2002. La structure supramoléculaire des substances humiques : Une nouvelle compréhension de la chimie de l'humus et des implications dans la science du sol. *Adv. Agron.* 75, 57-134. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(02\)75003-7](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(02)75003-7).
- Pittarello, M., Busato, J.G., Carletti, P., Zanetti, L.V., da Silva, J., Dobbss, L.B., 2018. Effets de différentes concentrations de substances humiques sur l'anatomie des racines et l'accumulation de Cd dans les semis d'*Avicennia germinans* (mangrove noire). *Mar. Pollut. Bull.* 130, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.005>.
- Pizzeghello, D., Nicolini, G., Nardi, S., 2002. Hormone-like activities of humic substances in different forest ecosystems. *New Phytol.* 155 (3), 393-402. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00475.x>.
- Pizzeghello, D., Francioso, O., Ertani, A., Muscolo, A., Nardi, S., 2013. Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances. *J. Geochem. Explor.* 129, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.007>.
- Pizzeghello, D., Schiavon, M., Francioso, O., Dalla Vecchia, F., Ertani, A., Nardi, S., 2020. Bioactivity of size-fractionated and unfractionated humic substances from two forest soils and comparative effects on n and s metabolism, nutrition, and root anatomy of *Allium sativum* L. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01203>.
- Popescu, G.C., Popescu, M., 2018. Rendement, qualité des baies et réponse physiologique de la vigne à l'application foliaire d'acide humique. *Bragantia* 77 (2), 273-282. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017030>.
- Portu, J., González-Arenzana, L., Hermosin-Gutiérrez, I., Santamaría, P., Garde-Cerdán, T., 2015. Applications foliaires de phénylalanine et d'urée à la vigne : effet sur le contenu phénolique du vin. *Food Chem.* 180, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.008>.
- Qiu, C., Sun, J., Shen, J., Zhang, S., Ding, Y., Gai, Z., Fan, K., Song, L., Chen, B., Ding, Z., Wang, Y., 2021. L'acide fulvique renforce la résistance à la sécheresse des théiers en régulant le métabolisme de l'amidon et du saccharose et certains métabolismes secondaires. *J. Proteomics* 247. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2021.104337>.
- Rachid, A.F., Rahem Bader, B., Al-Alawy, H.H., 2020. Effet de l'application foliaire d'acide humique et de nanocalcium sur la croissance, la production et les pigments photosynthétiques du chou-fleur (*Brassica oleracea* var *Botrytis*) planté dans un sol calcaire. *Plant Arch.* 20, 32-37.
- Raheem, S., Ibrahim Al-Jaf, H., Raheem, S.M., Al-Jaf, H.I., Tofiq, G.K., 2018. Influence de l'application foliaire et au sol de l'acide humique sur la croissance et le rendement de la laitue. *Euphrates J. Agric. Sci.* 10 (2), 199-204.
- Razavi Nasab, A., Fotovat, A., Astarai, A., Tajabadipour, A., 2019. Effet des déchets organiques et de l'acide humique sur certains paramètres de croissance et la concentration en nutriments des semis de pistaches. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 50 (3), 254-264. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1559328>.
- Reddy, K., Bhuvanewari, R., Karthikeyan, P.K. 2020. Effet de l'application foliaire de dap, d'acide humique et d'un mélange de micronutriments sur le rendement et les caractères de qualité de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) Var. Tmv 7 in sandy loam soil. Vol. 20 p. 521- 525.
- Reyes Perez, J.J., Izquierdo, F.G., Escobar, I.M.R., Ortega, Y.R., Mayoral, J.A.L., Amador, B.M., Espinoza, F.H.R., Fabre, T.B., Amador, C.A., Silvera, C.M.O., Morales, Y.A., Milanés, J.Y.R., 2011. Efectos del humus líquido sobre algunos parámetros de calidad interna en frutos de tomate cultivados en condiciones de estrés salino. *Centro Agrícola* 38 (3), 57-61.
- Ribeiro, F.E., del Peloso, M.J., Barbosa, F.R., de Gonzaga, A.C., de Oliveira, L.F.C., 2011. Recomendações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. *Circular técnica* 89, 1-64.
- Rodrigues, E.S., Montanha, G.S., Marques, J.P.R., de Almeida, E., Yabuki, L.N.M., Menegário, A.A., Pereira de Carvalho, H.W., 2020. Application foliaire d'éléments de terres rares sur le soja (*Glycine max* (L)) : Effets sur la biométrie et caractérisation de la phytotoxicité. *J. Rare Earths* 38 (10), 1131-1139. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.09.004>.
- Rodrigues, L.U., Ribeiro Da Silva, R., Araújo De Freitas, G., Carlos, A., dos Santos, M., De, R., Tavares, C., 2018. Applied Research & Agrotechnology vol 11, n.2, may/ aug. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V11.N2.11>.
- Rose, M.T., Patti, A.F., Little, K.R., Brown, A.L., Jackson, W.R., Cavagnaro, T.R., 2014. Une méta-analyse et une revue de la réponse de la croissance des plantes aux substances humiques : Practical implications for agriculture. In : *Advances in Agronomy*. Vol. 124, pp. 37-89. Academic Press Inc.
- Sachs, J., 1884. Ein Beitrag zur Kenntniss der Ernährungsthätigkeit der Blü Arbeit. *Botan. Inst. Würzburg* 3, 1-33.
- Safaei, Z., Azizi, M., Davarynejad, G., Aroiee, H., 2014. The Effect of Foliar Application of Humic Acid and Nanofertilizer (Pharmks) on Yield and Yield Components of Black Cumin (*Nigella sativa* L.). *J. Medicinal Plants By-products.* 2, 133-140.
- Saidimoradi, D., Ghaderi, N., Javadi, T., 2019. Atténuation du stress de la salinité par l'application d'acide humique dans la fraise (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Sci. Hortic.* 256. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108594>.
- Sant'Anna, S.A.C., Martins, M.R., Goulart, J.M., Araújo, S.N., Araújo, E.S., Zaman, M., Jantalia, C.P., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S., 2018. Biological nitrogen fixation and soil N₂ O emissions from legume residues in an Acrisol in SE Brazil. *Geoderma Reg.* 15. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00196>.
- Santoyo, L.F.R., González, G.A., Escobar, M.O., Estrada, A.E., Hernández, M.S., García, P.S., 1998. Fertilización foliar orgánica e inorgánica y rendimiento de sorgo en condiciones de salinidad. *Terra* 16 (3), 205-210.
- Savy, D., Brostaux, Y., Cozzolino, V., Delaplace, P., du Jardin, P., Piccolo, A., 2020. Quantitative structure-activity relationship of humic-like biostimulants derived from agro-industrial byproducts and energy crops (relations quantitatives structure-activité des biostimulants de type humique dérivés de sous-produits agro-industriels et de cultures énergétiques). *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00581>.

- Schreel, J.D.M., Steppe, K., 2020. Foliar water uptake in trees : negligible or necessary ? Trends Plant Sci. 25 (6), 590-603. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.01.003>.
- Shahabivand, S., Padash, A., Aghae, A., Nasiri, Y., Rezaei, P.F., 2018. Plant biostimulants (Funnelformis mosseae et substances humiques) plutôt que l'engrais chimique a amélioré les réponses biochimiques dans la menthe poivrée. Iranian J. Plant Physiol. 8 (2), 2333-2344. <https://doi.org/10.22034/ijpp.2018.539109>.
- Shindhe, V., Dhanoji, M.M., Meena, M.K., Patil, R.P., 2020. Influence de la nutrition organique foliaire sur la croissance, le rendement et les composantes du rendement du tournesol. J. Pharmacognosy Phytochem. 9 (1), 1267-1269.
- Silva-Matos, R.R.S., Cavalcante, Í.H.L., Júnior, G.B.S., Albano, F.G., Cunha, M.S., Beckmann-Cavalcante, M.Z., 2012. Pulvérisation foliaire de substances humiques sur la production de semis de pastèque cv. Crinson sweet. J. Agron. 11 (2), 60-64.
- Sindha, D.J., Satodiya, B.N., Sutariya, N.K., 2018. Effet de l'application foliaire de différents produits chimiques et de l'acide humique sur le rendement et la qualité des fruits de la pomme custard (*Annona squamosa* L.) cv local. Int. J. Chem. Stud. 6 (5), 75-77.
- Sladky, Z., 1959. L'application de substances d'humus extraites aux parties aériennes des plantes. Biol. Plant. 1 (3), 199-204.
- Souri, M.K., Hatamian, M., 2019. Aminochelates in plant nutrition : a review. J. Plant Nutr. 42 (1), 67-78.
- Stevenson, F.J., 1994. Humus chemistry. Genèse, composition, réactions. John Wileyand Sons, New York.
- Suh, H.Y., Yoo, K.S., Suh, S.G., 2014. Tuber growth and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by foliar or soil application of fulvic and humic acids. Hort. Environ. Biotechnol. 55 (3), 183-189. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0005-x>.
- Susithra, M., Balasubramanian, A., Gobi, R., Sathiyamurthi, S., 2019. Maximisation du rendement avec la gestion des nutriments et les pratiques de pépinière sur le gramme rouge transplanté (*Cajanus cajan* (L) MILLSP.). Plants Arch. 19 (1), 323-326.
- Tagliavini, M., Toselli, M., 2005. Foliar applications of nutrients. Food-Web Interactions, 53-59.
- Tavares, O.C.H., Santos, L.A., Ferreira, L.M., Sperandio, M.V.L., Da Rocha, J.G., Garcia, A.C., Dobbss, L.B., Barbara, R.L.L., De Souza, S.R., Fernandes, M.S., 2017. L'acide humique améliore de manière différentielle la cinétique du nitrate dans les systèmes à faible et à forte affinité et modifie l'expression des H⁺-ATPases de la membrane plasmique et des transporteurs de nitrate chez le riz. Annals of Applied Biology 170, 89-103. <https://doi.org/10.1111/aab.12317>.
- Tei, F., de Neve, S., de Haan, J., Kristensen, H.L., 2020. Gestion de l'azote dans les cultures maraichères. Agric. Water Manage. 240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., 2003. Influence de la fertilisation foliaire avec des acides aminés et des acides humiques sur la productivité et la qualité de l'asperge. Biol. Agric. Hort. 21 (3), 277-291. <https://doi.org/10.1080/01448765.2003.9755270>.
- Tejada, M., Rodríguez-Morgado, B., Paneque, P., Parrado, J., 2018. Effets de la fertilisation foliaire d'un biostimulant obtenu à partir de plumes de poulet sur le rendement du maïs. Eur. J. Agron. 96, 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.003>.
- Teli, S.B., Mawade, P., Yenagi, B., Kuligod, V., 2020. Soil and foliar application of humic acid on productivity of groundnut (*Arachis hypogea* L.). Int. J. Chemical Stud. 8 (1), 1315-1318. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1.8438>.
- Terra, S.B., Oliveira, D.P.P., 2013. Floricultura : a produção de flores como uma nova alternativa de emprego e renda para a comunidade de Bagé-RS. Revista Conexão UEPG 9 (2), 342-353.
- Thakur, H., Rekha, K.B., Giri, Y.Y., Babu, S.N.S., Padmaja, G., 2017. Propriétés physico-chimiques et comptage microbien du sol après la récolte du tournesol (*Helianthus Annuus* L.) comme influencé par l'acide humique et l'acide fulvique. Bull. Environ. Pharmacol. Life Sci. 6 (3), 413-416.
- Tranvik, L.J., 2014. Dystrophie dans les systèmes d'eau douce. Module de référence en sciences des systèmes terrestres et de l'environnement. Elsevier.
- Urrutia, O., Fuentes, M., Olaetxea, M., Garnica, M., Baigorri, R., Zamarreño, A. M., Movila, M., de Hita, D., Garcia-Mina, J. M. 2020. L'effet de la matière organique du sol sur la nutrition minérale des plantes. In : Z. Rengel (Ed.), Achieving sustainable crop nutrition. pp. 291-306.
- Vaccaro, S., Ertani, A., Nebbioso, A., Muscolo, A., Quaggiotti, S., Piccolo, A., Nardi, S., 2015. Les substances humiques stimulent l'assimilation de l'azote par le maïs et le métabolisme des acides aminés aux niveaux physiologique et moléculaire. Chem. Biol. Technol. Agric. 2 (1). <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0033-5>.
- van Tol de Castro, T.A., Garcia, A.C., Tavares, O.C.H., Pereira, E.G., de Souza, C.D.C.B., Torchia, D.F.D.O., de Pinho, C.F., Castro, R.N., 2022. Humic acids affect L'efficacité quantique de la photosynthèse chez le riz en cas de déficit hydrique. Theor. Exp. Plant Physiol. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00258-w>.
- van Wissenlingh, C., 1895. Sur la cuticularisation et la cutine. Neerland. Sc.Exact. Natur. 28, 373-410.
- Vani, K., Rekha, B., Divya, G., Vani, K.P., Rekha, K.B., Divya, G., Nalini, N., 2017. Organic farming in Groundnut View project Quality parameters of nutri-cereal browntop millet through agronomic practices View project Performance of summer sesamum (*Sesamum indicum* L.) under integrated nutrient management. J. Pharmacognosy Phytochem. 6 (5).
- Varanini, Z., Pinton, R., 1995. Humic Substances and Plant Nutrition. Progrès en botanique, 97-117.
- Villegas-Espinoza, J.A., Reyes-Pérez, J.J., Nieto-Garibay, A., Higinio Ruiz-Espinoza, F., Cruz-Falcón, A., Murillo-Amador, B., 2018. Biostimulant Liplant®: son effet sur *Solanum lycopersicum* (L.) cultivé sur des sols légèrement salins. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Special 20, 4137-4147.
- von Dohl, 1947. Untersuchung der frage : bildet die cellulose die grunglage sammtlicher vegetabilixchen membranen ? Bot Zeitung 5, 497-505.
- Wadas, W., Dziugiel, T., 2020. Changements dans la surface d'assimilation et la teneur en chlorophylle des cultivars de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) très précoces sous l'influence des biostimulants. Agronomy 10 (3). <https://doi.org/10.3390/agronomy10030387>.
- Wang, S., Tian, X., Liu, Q., 2020. L'efficacité des applications foliaires de zinc et des biostimulants pour augmenter la concentration en zinc et la biodisponibilité du grain de blé. Agronomy 10 (2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020178>.
- Wang, Y., Yang, R., Zheng, J., Shen, Z., Xu, X., 2019. L'application foliaire exogène d'acide fulvique atténue la toxicité du cadmium dans la laitue (*Lactuca sativa* L.). Ecotoxicol. Environ. Saf. 167, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.064>.
- Xudan, X., 1986. The effect of foliar application of fulvic acid on water use, nutrient uptake and yield in wheat. Aust. J. Agr. Res. 37 (4), 343-350. <https://doi.org/10.1071/AR9860343>.
- Yadav, G., Meena, M., 2021. Bioprospection des endophytes dans les plantes médicinales du désert de Thar : une ressource intéressante pour les produits biopharmaceutiques. Biotechnol. Rep, 30. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00629>.
- Yildirim, E., Ekinci, M., Turan, M., Ag'ar, G., Dursun, A., Kul, R., Alim, Z., Argin, S., 2021. Humic + Fulvic acid mitigated Cd adverse effects on plant growth, physiology and biochemical properties of garden cress. Sci. Rep. 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94860-8>.
- Yu, X., Yang, J., Wang, E., Li, B., Yuan, H., 2015. Effets du stade de croissance et de l'acide fulvique sur la diversité et la dynamique de la communauté bactérienne endophyte dans les feuilles de stevia rebaudiana bertonii. Front. Microbiol. 6 (AUG). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00867>.
- Zafar, S., Li, Y.L., Li, N.N., Zhu, K.M., Tan, X.L., 2019. Avancées récentes dans l'amélioration de la teneur en huile des cultures oléagineuses. J. Biotechnol. 301, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.307>.
- Zandonadi, D.B., Canellas, L.P., Façanha, A.R., 2007. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺pumps activation. Planta 225, 1583-1595.
- Zandonadi, D.B., Santos, M.P., Dobbss, L.B., Olivares, F.L., Canellas, L.P., Binzel, M.L., Okorokova-Façanha, A.L., Façanha, A.R., 2010. Nitric oxide mediates humic acids-induced root development and plasma membrane H⁺-ATPase activation. Planta 231 (5), 1025-1036. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1106-0>.
- Zandonadi, D.B., Santos, M.P.S., Medici, L.O., Silva, J., 2014. Ação da matéria orgânica e suas frações sobre a fisiologia de hortaliças. Hort. Bras. 32, 14-20.
- Zanin, S., Lidron, E., Rizzuto, R., Pallafacchina, G. 2019. Méthodes de mesure de la concentration intracellulaire de Ca²⁺ à l'aide de colorants sensibles à Ca²⁺. In : Methods in Molecular Biology. Vol. 1925, pp. 43-58. Humana Press Inc.
- Zárate, N.A.H., Vieira, M.C., 2017. Hortas : conhecimentos básicos. Siriema ; Dourados : MS, pp. 1-289.
- Zhou, J., Zhang, C., Du, B., Cui, H., Fan, X., Zhou, D., Zhou, J., 2021. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation : comparison of soft vs. durum wheat varieties. J. Hazard. Mater. 402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123546>.
- Zotarelli, L., Zatorre, N.P., Boddey, R.M., Urquiaga, S., Jantalia, C.P., Franchini, J.C., Alves, B.J.R., 2012. Influence de l'absence de labour et de la fréquence d'une légumineuse d'engrais vert dans les rotations de cultures pour équilibrer les sorties d'azote et préserver les stocks de carbone organique du sol. Field Crop Res 132, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.013>.