

R É S U M É

de la thèse de doctorat

PRODUCTION DE BIOSTIMULANTS POUR PLANTES À BASE DE CÉRAMIQUES POREUSE

Doctorant: RÁDULY Orsolya-Csilla

Coordinateur scientifique: CS I dr. habil. OANCEA Florin

MOTS-CLÉS: biostimulants, amélioration des sols, produits secondaires, céramique poreuse, processus nutritionnels

Pour garantir des récoltes sûres et stables, l'une des approches les plus prometteuses et les plus respectueuses de l'environnement est l'utilisation de biostimulants pour plantes. Selon le Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil européen, les biostimulants pour plantes sont définis comme « un produit qui stimule les processus nutritionnels des plantes indépendamment de la teneur en nutriments du produit, dans le but unique d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes de la plante ou de sa rhizosphère: (a) l'utilisation efficace des nutriments; (b) la tolérance au stress abiotique; (c) les caractéristiques qualitatives (de la récolte) ; (d) la disponibilité des nutriments absorbés du sol ou de la rhizosphère. »

Les biostimulants pour plantes, tout comme certains engrais/agents d'amélioration du sol, sont également obtenus à partir de divers sous-produits de la bioéconomie, tels que la terre de diatomées, un sous-produit de la filtration de la bière ou la bentonite, un sous-produit de la filtration du vin. L'utilisation de sous-produits réduit leur impact sur l'environnement.

Un domaine nouveau et très efficace est celui de la réalisation de produits céramiques poreux, à base de sous-produits de la bioéconomie, imprégnés de nutriments permettant leur libération lente, afin d'améliorer la croissance des plantes, la fertilité des sols et la santé générale de l'écosystème.

La structure poreuse des granulés céramiques assure : une rétention optimale de l'air, de l'eau et des nutriments dans la zone racinaire, une réduction de la compaction, une amélioration du drainage et une augmentation de la structure des sols.

Cette structure permet la libération contrôlée des nutriments pour les plantes, assurant ainsi leur développement harmonieux.

Cette thèse de doctorat a pour objectif de développer une technologie de production de biostimulants à base de céramique poreuse, efficaces tant pour le développement optimal des plantes que pour la nutrition des plantes cultivées dans les sols concernés.

L'objectif de cette étude est de développer et d'optimiser la technologie de production de granulés céramiques poreux afin de valoriser pleinement leur potentiel, en incluant dans les céramiques des éléments bénéfiques pour les plantes (potassium, phosphore, silicium), pour augmenter le chargement en éléments favorables aux biostimulants pour celles-ci.

Les objectifs découlant de cette nécessité de développer et d'optimiser la technologie moderne de production de céramiques poreuses avec des fertilisants et des biostimulants sont :

1) réaliser des produits en céramique poreuse en utilisant des matières premières locales et non conventionnelles : argile de Bodoc, argile de Valea Zălanului et argile de Balint, diatomite provenant des gisements de Filia et de Pătârlagele, ainsi que des sous-produits de la bioéconomie, tels que la diatomite silicieuse résultant de la filtration de la bière (Sânsimion, Miercurea Ciuc) ou la bentonite provenant de la filtration du vin (Miniș).

2) optimiser la technologie de production de céramique poreuse et l'imprégner de nutriments favorables à la croissance et au développement des plantes, ainsi que fabriquer les quantités nécessaires pour réaliser les expériences sur les plantes;

3) caractérisation physico-chimique des céramiques poreuses avec nutriments imprégnés;

4) tester des effets des céramiques poreuses sur les tomates, les poivrons et les concombres.

La thèse est structurée en deux parties et contient 95 figures et 27 tableaux.

La première partie représente l'étude bibliographique réalisée sur le sujet abordé et est divisée en trois chapitres.

Chapitre I. Biostimulants inorganiques pour les plantes.

Les catégories de biostimulants pour plantes sont brièvement présentées, y compris les effets spécifiques des biostimulants pour plantes et les biostimulants inorganiques (en particulier le silicium et le silicium soluble).

Chapitre II. Céramiques poreuses comme support pour la libération contrôlée des biostimulants inorganiques / des nutriments minéraux.

Les principales utilisations des granulés céramiques poreux en agriculture sont abordées, notamment : l'amélioration des caractéristiques des sols sableux ; l'amélioration des caractéristiques du substrat de croissance ; les effets sur les racines

des plantes et sur le microbiome racinaire ; l'influence des caractéristiques d'échange de cations sur leur utilisation en tant qu'amendements de sol ; l'activation des processus qui mobilisent les réserves de phosphore du sol et la libération lente des formes de silicium soluble.

Chapitre III. Production des granulés céramiques poreux et leur caractérisation physico-chimique.

Ce chapitre traite de la production des granulés céramiques poreux (méthodes de production ; transformations chimiques pendant le processus de frittage) ; des caractéristiques des céramiques poreuses (structure des céramiques poreuses, action capillaire ; capacité de rétention d'eau) et des fonctions des céramiques poreuses (groupes fonctionnels pour la liaison des biostimulants inorganiques).

La deuxième partie contient les résultats originaux de la thèse et est divisée en trois chapitres.

Chapitre IV. Granulés céramiques qui retiennent l'eau et les nutriments minéraux (potassium) dans le sol.

Ce chapitre présente les matériaux et les méthodes (matières premières – diatomite et argile de Bodoc – pour la production des granulés céramiques poreux ; production des céramiques poreuses ; chargement des granulés avec des nutriments minéraux) ; caractérisation des granulés céramiques poreux (caractéristiques physico-chimiques ; caractéristiques structurales et morphologiques des granulés céramiques poreux) ; investigation de la désorption du potassium dans une solution aqueuse ; étude de la migration de K⁺ à travers des sols fertiles ; méthode de réalisation de l'expérience en champ (matériau biologique et autres types de matériaux) ; l'influence de l'utilisation des granulés céramiques poreux – SAB / boue de diatomée et argile de Bodoc – sur le développement des plantes et la production de tomates cultivées en champ libre; analyses physiologiques des plants de tomates cultivés en champ et résultats et discussions (résultats sur la rétention d'eau et de nutriments minéraux et caractéristiques structurales et morphologiques des produits céramiques) ; résultats concernant l'influence des granulés SAB sur le développement des plantes et la production de fruits (détermination de l'efficacité de la photosynthèse et de la résistance stomatique).

Sur la base des résultats obtenus, les conclusions les plus importantes peuvent être tirées :

- Les granulés céramiques poreux font partie des produits les plus efficaces utilisés dans la réhabilitation des sols et peuvent être obtenus par des procédés technologiques spécifiques à l'industrie des céramiques techniques.
- La structure d'une céramique poreuse est constituée de particules séparées par des vides—appelés pores. Ces caractéristiques favorisent et améliorent l'aération dans la zone racinaire ainsi que la capacité de stockage de l'eau et de l'air.

- Avantages des granulés céramiques poreux : Ils assurent l'humidité et la circulation de l'air, offrent un environnement aéré et retiennent l'eau. Grâce à leur grande porosité et leur capacité d'absorption élevée, ils peuvent stocker une plus grande quantité d'éléments nutritifs, ce qui permet de les maintenir dans la zone racinaire pendant une période plus longue.
- Le but de l'utilisation de ces granulés est la libération progressive des nutriments minéraux à un rythme qui assure leur absorption par les plantes. Ils ont des effets significatifs sur l'amélioration du drainage du sol et se désagrègent finalement dans un délai relativement court.
- Les granulés céramiques poreux ont été analysés d'un point de vue physique selon les méthodes standardisées existantes : la densité apparente, la porosité apparente et la capacité d'adsorption. La morphologie des surfaces des échantillons obtenus a été examinée à l'aide de la microscopie MEB.
- Sur la base des analyses physico-chimiques effectuées, il a été constaté que parmi les granulés céramiques poreux produits, le plus efficace était le S.A.B.5 avec 80 % de terre de diatomées et 20 % d'argile de Bodoc.
- L'avantage des granulés céramiques poreux biostimulants – S.A.B.5 – est qu'ils sont constitués de matières premières écologiques (formant des pores) – terre de diatomées-silicium issue de la filtration de la bière et argile de Bodoc – qui ne contaminent pas le sol, les eaux souterraines ou les plantes. Une fois qu'ils décomposent, ils ne laisseront aucun résidu. Leurs caractéristiques sont : couleur : brun-rougeâtre ; densité apparente : 0,67 kg/dm³ ; porosité apparente : 33,67 % ; et capacité d'adsorption : 88,23 %.
- D'après l'étude de la migration de K⁺ à travers une solution aqueuse, il a été conclu que les traitements thermiques n'influencent pas de manière significative la libération de potassium des granulés céramiques poreux.
- De plus, l'étude de la migration de K⁺ à travers un sol fertile a révélé que la libération de K⁺ à travers le sol fertile est plus lente par rapport à sa libération dans une solution aqueuse.
- Compte tenu des caractéristiques des granulés S.A.B.5, leur utilisation est recommandée pour la pratique d'une agriculture durable.
- Les études de terrain ont démontré que garantir une disponibilité optimale du potassium pendant la culture, ainsi que la rétention d'eau et l'aération du sol autour des racines, conduit à de meilleurs résultats de croissance des plantes.

Chapitre V. Granulés céramiques qui retiennent l'eau et mobilisent les réserves de phosphore

Les matériaux et méthodes expérimentales sont développés (matières premières: bentonites et argile de Bodoc; obtention de céramiques poreuses ; chargement des granulés avec des nutriments minéraux ; caractérisation des granulés céramiques - caractérisation physico-mécanique et caractérisations structurales et

morphologiques ; la méthode de réalisation de l'expérience en la serre) ; l'influence de l'utilisation de granulés céramiques poreux-BA/Bentonite issus de la filtration du vin et de l'argile Bodoc sur le développement et la production de plants de tomates et de poivrons cultivés en serre ; résultats et discussion (résultats concernant les granulés céramiques poreux obtenus qui retiennent l'eau et le phosphore dans la serre et les caractéristiques physicochimiques – ATG, BET, DRX, FTIR, MEB).

De plus, les résultats concernant l'influence des granulés sur la production de fruits de tomates cultivées en serre en 2021 sont présentés, ainsi que les résultats expérimentaux sur l'effet des granulés céramiques poreux sur la physiologie et la qualité de la production de tomates et de poivrons cultivés en serre en 2021 (détermination de la résistance stomatique).

En conclusion, on peut affirmer que :

- L'utilisation de granulés d'argile avec des sous-produits de bentonite augmente la résistance à la sécheresse des poivrons soumis au test. Un traitement supplémentaire avec KNO_3 apporte un surplus de résistance à la sécheresse, tandis que l'ajout de phosphate de monoammonium ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) n'altère pas l'effet des granulés d'argile avec sous-produits de bentonite. Une concentration plus élevée d'ions phosphate (V7) inhibe presque complètement la résistance à la sécheresse des plantes testées. Les tomates Kivelli ont mieux répondu aux variantes V4 et V7.
- Les tomates Pink Impression ont mieux répondu aux traitements : V3, V2, V4 et V7.
- Les poivrons Claudius ont mieux répondu aux traitements : V4, V5, V3 et V6.
Les traitements V2-V7 se réfèrent à :
 - V2 : Plantes traitées uniquement avec PCG50 à haute capillarité ;
 - V3 : Plantes traitées uniquement avec PCG60 à haute capillarité ;
 - V4 : Plantes traitées avec PCG50 contenant du K ;
 - V5 : Plantes traitées avec PCG60 contenant du K ;
 - V6 : Plantes traitées avec PCG50 contenant du PO_4^{3-} ;
 - V7 : Plantes traitées avec PCG60 contenant du PO_4^{3-} .

Chapitre VI. Céramiques poreuses avec libération contrôlée de silicium

Les matériaux et méthodes expérimentales sont présentés (matériaux biologiques, méthodes et organisation des expériences ; développement de produits à base de céramiques poreuses avec libération contrôlée de silicium ; caractérisation des céramiques poreuses avec libération contrôlée de silicium ; tester des céramiques poreuses sur *Momordica charantia* ; détermination de l'influence des traitements avec des céramiques poreuses libérant du silicium sur l'accumulation de composés bioactifs dans les fruits de margose, sur la physiologie et sur les niveaux de production) ; résultats et discussions (production et caractérisation des granulés de céramique poreuse ; influence des traitements avec des céramiques poreuses libérant du silicium

sur la production et la physiologie des plantes de *M. charantia* ; caractérisation de l'accumulation de composés bioactifs dans les plantes de *M. charantia*).

En conclusion, on peut affirmer que :

- Des granulés céramiques poreux ont été développés, dans lesquels non seulement un simple passage du fluide nutritif à travers les pores se produit, mais un phénomène complexe de sorption-désorption a lieu dans le système sol-granulé-plante.
- Parmi les propriétés des céramiques poreuses, les suivantes ont été mises en évidence : la densité apparente, la capacité d'adsorption, la porosité apparente, la distribution et la taille des pores, la composition et la structure des phases, ainsi que la résistance mécanique.
- Il a été constaté que les formulations de céramique poreuse contenant de la diatomée ont une grande capacité de libération de silicium et entraînent des effets bénéfiques sur les plantes de margose, notamment l'optimisation des processus de photosynthèse, l'augmentation des niveaux de production et l'accumulation de composés bioactifs.

Chapitre VII. Conclusions générales et perspectives

En raison de leurs bonnes propriétés physico-chimiques, les céramiques poreuses stimulent la croissance du système racinaire des plantes, améliorent la résistance au stress hydrique, ainsi que la résistance au piétinement et au détachement.

Les céramiques poreuses sont un produit accessible pour la production de substrats de croissance, importants non seulement pour l'entretien des espaces verts dans les parcs, mais aussi pour la production de plants de légumes et de fleurs ou pour la culture de légumes en espaces protégés.

Des masses céramiques poreuses ont été synthétisées à partir d'argiles locales—Bodoc, Balint, argile réfractaire—ainsi que de diatomite de Pătârlage et Filia et des additifs provenant de sous-produits de la bioéconomie : boues de diatomite issues de la filtration de la bière (Sânsimion et Miercurea Ciuc) et boues de bentonite provenant du traitement du vin blanc et rouge (Miniș).

La technologie utilisée est celle employée dans l'industrie céramique, avec la phase principale étant le façonnage, spécifiquement la granulation par roulage. Toute forme de compactage a été évitée afin d'obtenir un produit avec une porosité adéquate.

Les granulés céramiques poreux ont été examinés par leurs caractéristiques physiques (absorption, densité, porosité), des images MEB, IR, etc. Les processus thermiques durant la frittage des produits céramiques ont été contrôlés par des analyses ATG.

La taille et la distribution des pores affectent de manière significative la résistance et la durabilité des céramiques. En général, une porosité élevée assure une meilleure absorption de l'eau et augmente également la capacité d'absorption des nutriments biostimulants dans le produit. Plus la valeur de la porosité et de

l'absorption de l'eau est élevée, plus le produit céramique peut absorber de nutriments biostimulants favorables à la croissance et au développement des plantes.

Les tests biologiques avec des granulés céramiques poreux ont démontré la présence d'effets spécifiques de biostimulants pour les plantes.

Il convient de souligner l'effet positif du produit SAB5 avec le nutriment KNO_3 ainsi que des masses BA50/Bentonite provenant de la filtration du vin (50%) et d'argile de Bodoc (50%) et BA60/Bentonite provenant de la filtration du vin (60%) et d'argile de Bodoc (40%), avec des nutriments KNO_3 , sur la qualité des tomates et des poivrons.

Un effet positif significatif des traitements avec les produits SAB5, BA50 et BA60 sur la physiologie des plantes, en particulier l'efficacité de l'utilisation de l'eau déterminée par la résistance stomatique, a été observé tant pour les cultures de tomates que pour les poivrons.

Il convient de souligner que le mélange SAB5 contient 80 % de boue de diatomite provenant de la fabrication de la bière, ainsi que de l'argile de Bodoc. Les mélanges BA50 et BA60 contiennent également une proportion élevée de boue de bentonite provenant de la fabrication du vin, 50 % dans BA50 et 60 % dans BA60. L'utilisation de ces boues présente des avantages économiques (économies sur des matières premières plus coûteuses) et écologiques (protection de l'environnement).

Sur la base des résultats obtenus à partir des expériences, il est observé que BA50K/Bentonite de la filtration du vin 50% et argile de Bodoc 50% avec un contenu en KNO_3 a eu un effet significatif sur les cultures. Ainsi, on peut affirmer que les « granulés céramiques poreux » sont des nutriments efficaces pour les « plantes de serre.

Les granulés céramiques contenant de la diatomite libèrent progressivement du silicium soluble, ce qui a des effets bénéfiques sur les plantes de margose.

Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation de matériaux céramiques poreux, incluant des sous-produits de la bioéconomie et imprégnés de nutriments, permet d'obtenir des rendements de cultures horticoles (tomates, poivrons et margoses) sûrs et stables, avec une teneur accrue en composés bioactifs.