



La défense des plantes cultivées mycorhizées face aux stress abiotiques et biotiques

Par
Christian Provençal

Conseillé par
M. J. André Fortin



Introduction sur les mycorhizes

« La symbiose mycorhizienne est un phénomène fondamental et universel dans l'évolution et le fonctionnement des plantes et des écosystèmes terrestres. » J. André Fortin



Plan de la présentation

- Introduction
 - Problématique
 - Hypothèse
 - Introduction des mycorhizes
 - Définitions utiles pour la compréhension
- Développement
 - Stress abiotique
 - Stress hydrique
 - Stress salin
 - Stress biotique
 - Stress causés par des pathogènes
 - Stress causés par des insectes
 - Signaux inter-plants
- Conclusion
 - Résumé
 - Retour sur l'hypothèse
 - Ouverture du sujet

Problématique

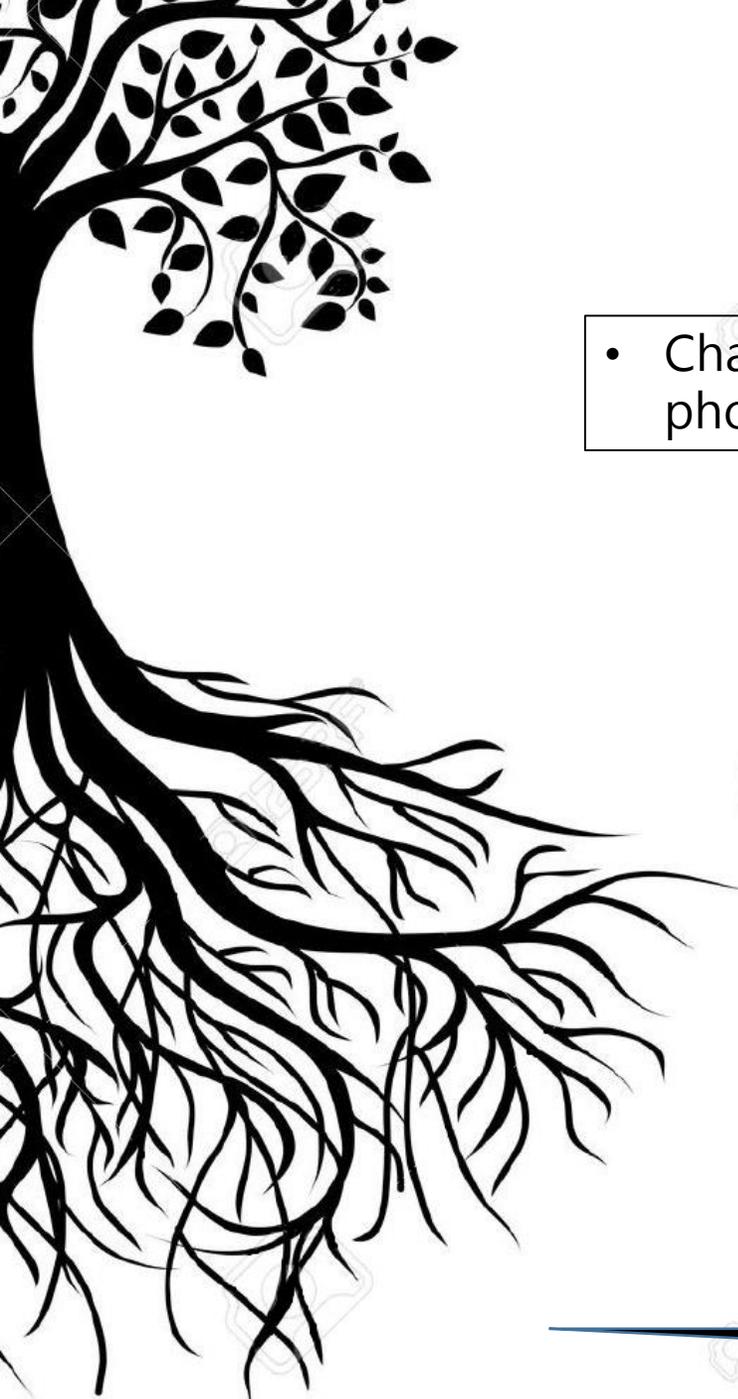
- Producteurs de plus en plus dépendants des pesticides
- Sélection génétique concentrée vers:
 - un rendement plus élevés
 - une qualité accru du produit
 - une conservation du produit allongée
 - parfois au détriment de la résistance aux maladies et aux stress abiotiques
- Changements climatiques pouvant ébranler la stabilité des systèmes agricoles
- Vers une agriculture plus naturelle



Hypothèse

« L'ajout de mycorhizes en agriculture permet à la plante de réduire l'incidence des stress biotiques et abiotiques. »

Réponse : à voir à la fin de cet exposé...



Introduction sur les mycorhizes

Avantages de la symbiose

- Champignon se nourrit des photosynthétats de la plantes

- Plante acquiert de nombreux avantages dont:
 - Surface d'absorption accrue
 - Amélioration de l'absorption des minéraux et de l'eau
 - Solubilisation du phosphore
 - Résistance à certains stress abiotique
 - Salinité
 - Sécheresse
 - Métaux lourds
 - Résistance à des stress biotiques
 - Pathogènes
 - herbivores



Introduction sur les mycorhizes

Types de mycorhizes et leurs plantes hôtes

Types de mycorhizes		
Types	Champignons impliqués	Plantes hôtes
Arbusculaires	Gloméromycètes (~200 espèces)	Bryophytes et plantes vasculaires (~80% des espèces actuelles) (selon Marcel G. A. van der Heijden et al. 1998)
Ectomycorhizes	Basidiomycètes et ascomycètes (>1000 espèces)	Arbres gymnosperme et angiosperme (~5% des espèces actuelles)
Ectendomycorhizes	Deutéromycètes (quelques espèces)	Pins
Arbutoides	Basidiomycètes (quelques espèces)	Éricacées
Éricoïdes	Ascomycètes (quelques dizaines d'espèces)	Éricacées (~5% des espèces actuelles)
Orchidoïdes	Basidiomycètes et mycéliums stériles peu connus	Orchidées (~10% des espèces actuelles)
Sebacinoïdes	Piriformospora, basidiomycètes (quelques espèces)	Variées

Tableau tiré du livre de Fortin et al. (2015) : Les mycorhizes: L'essor de la nouvelle évolution verte



Introduction sur les mycorhizes

Structure unique des champignons arbusculaires: l'arbuscule

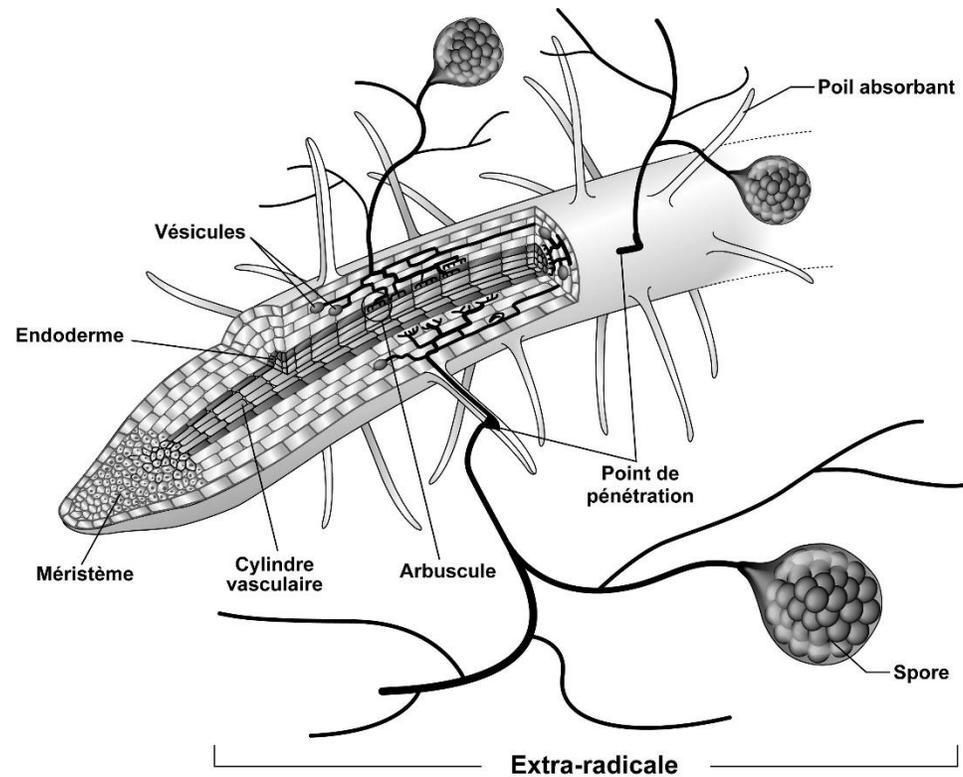


Image tiré du livre de Fortin et al. (2015) : Les mycorhizes: L'essor de la nouvelle évolution verte

Définitions utiles

- Voie **apoplastique**: transport d'eau à l'extérieur des cellules végétales
- Voie **symplastique** : transport d'eau à l'intérieur des cellules, via les **plasmodesmes** (canal reliant les cellules entre-elles) et les **aquaporines** (protéines membranaires)





Stress hydrique



Développement Stress hydrique

Études combinée sur l'effets des mycorhizes sur les propriétés hydriques des racines de plants de tomates et de maïs (Barzana et al. 2012)

- 2 espèces
 - Tomate
 - Maïs
- 50% mycorhizés (*Glomus intraradices*)
- 50% en condition de stress hydrique
- Un colorant a été ajouté

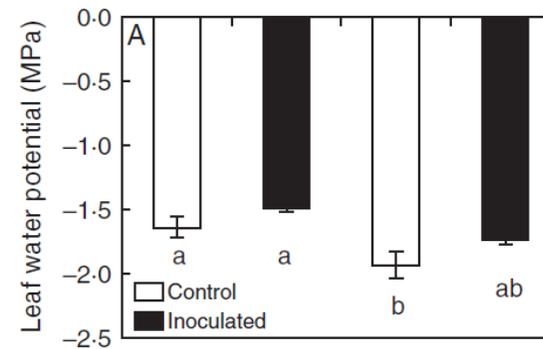
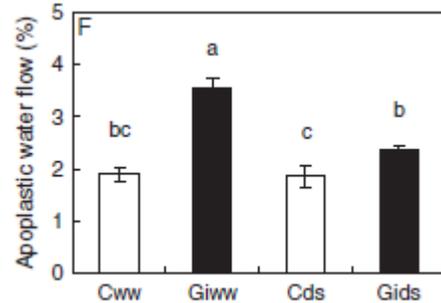
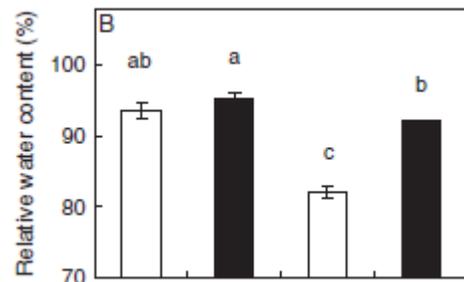
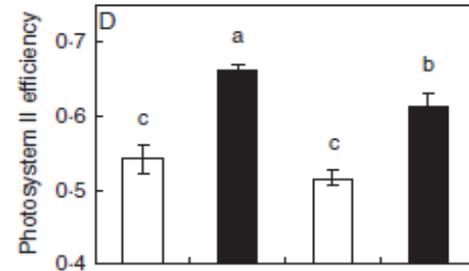
- Plants de maïs
- 50% mycorhizés (*Glomus intraradices*)
- 50% en condition de stress hydrique
- Un inhibiteur d'aquaporine a été appliqué afin de mieux voir les effets des mycorhizes sur le transport hydrique de la plante



Développement Stress hydrique

Résultats :

- une plus grande efficacité du photosystème II
- Un plus grand contenu d'eau relatif
- Une plus grande proportion du flux apoplastique de l'eau
- Un potentiel hydrique des feuille plus élevé





Stress salin

A stylized black and white illustration of a tree with a thick trunk and many branches with leaves, extending from the top left towards the center of the slide.

Développement

Stress Salin

Étude sur l'effet des mycorhizes sur la tolérance du maïs en condition de stress salin (Boyacioglu et Uyanöz, 2014)

- Deux souches des mycorhizes, soit *Glomus mossae* et un mélange de mycorhizes présents naturellement dans des milieux salins.
- Plants de maïs soumis à des stress de 2, 2.5, 3.5, 5.8, 8, et 12.0 dS/m. (1 Ds/m = 640 ppm de sel)
- Calcul des proportions de nutriments par ICP (Spectrométrie à plasma à couplage inductif)



Développement Stress Salin

Résultats

- Les plants inoculés des deux souches de mycorhizes ont démontré une plus grande proportion de P, K, Ca, Mg, Zn, Cu et Mn et une réduction de la quantité de Na.
- Les plants inoculés des deux souches ont généralement démontré une plus grande quantité de matière sèche et fraîche par rapport à ceux non inoculés.



Stress par les pathogènes



Développement Stress pathogènes

Amélioration du système de défense de la plante par le démarrage forcé lors de la pénétration des mycorhizes dans les cellules racinaires

- Changements dans la plante lors de la colonisation (éliciteurs)
 - la perméabilité des ions des membranes plasmiques
 - les activations des kinases et des phosphatases
 - la production de signaux moléculaires
 - Activation de la transcription des gènes de défense
- Lors de la reconnaissance des mycorhizes par la plante (apparition du phénomène de symbiose) ces réactions de défenses sont réduites, mais demeurent sur le qui-vive
- C'est ce qu'on appelle dans le jargon scientifique:
« *induced resistance and priming of plant defense* »

Développement Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

TABLE 3.1. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and soilborne fungal pathogens.

Crop species	Pathogen ^a	Mycorrhizal species ^a	References
<i>Albizia procera</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Glomus fasciculatus</i> <i>G. tenuis</i>	Chakravarty and Mishra, 1986b
<i>Allium cepa</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>cepa</i> <i>Phoma terrestris</i> <i>Pyrenochaeta terrestris</i> <i>Sclerotium cepivorum</i> <i>Thielaviopsis basicola</i>	<i>Glomus</i> sp. Unidentified species	Becker, 1976; Cole and Lim in Dehne, 1982; Cole and Mokhtar in Dehne, 1982; Safir, 1968; Torres-Barragán et al., 1996
<i>Agrostis stolonifera</i>	<i>Microdochium nivale</i>	Wild population	Gange and Case, 2003
<i>Ananas comosus</i>	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	<i>Glomus</i> sp.	Guillemin et al., 1994
<i>Arachis hypogaea</i>	<i>Sclerotium rolsfii</i> <i>Fusarium solani</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. fasciculatum</i> <i>G. mosseae</i>	Abdalla and Abdel-Fattah, 2000; Krishna and Bagyaraj, 1983
<i>Arachis</i> sp.	<i>Sclerotium rolsfii</i>	Unidentified species	Jalali and Hisar, 1991
<i>Asparagus officinalis</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>Fusarium</i> sp. <i>Helicobasidium mompa</i>	<i>G. fasciculatum</i> <i>Glomus</i> sp. <i>Gigaspora margarita</i>	Hamel et al., 2004; Matsubara et al., 2000, 2001, 2002; Wacker et al., 1990; Yergeau, 2004
<i>Brassica napus</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Unidentified species	Iqbal and Mahmood, 1986; Mahmood and Iqbal, 1982
<i>B. oleracea</i>	<i>Fusarium moniliforme</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. mosseae</i> Unidentified species	Iqbal et al., 1987, 1988a, 1988b
<i>Cajanus cajan</i>	<i>Fusarium udum</i> <i>Phytophthora dreschleri</i>	<i>Glomus</i> sp. <i>Gi. Calospora</i>	Jalali and Hisar, 1991
<i>Carica papaya</i>	<i>Phytophthora palmivora</i>	Unidentified species	Ramirez, 1974
<i>Cassia tora</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>G. fasciculatus</i> <i>G. tenuis</i>	Chakravarty and Mishra, 1986a

Développement

Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

TABLE 3.1 (continued)

Crop species	Pathogen ^a	Mycorrhizal species ^a	References
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Wild population <i>G. mosseae</i>	Bartschi et al., 1981
<i>Cicer arietinum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>G. fasciculatum</i>	Jalali and Hisar, 1991
<i>Citrus</i> sp.	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>Phytophthora parasitica</i> <i>Thielaviopsis basicola</i>	<i>G. etunicatum</i> <i>G. intraradices</i> <i>G. fasciculatus</i> Unidentified species	Davis, 1980; Davis and Menge, 1980; Davis et al., 1978, 1979; Graham, 1988; Nemeč, 1979; Schenck et al., 1977
<i>C. sinensis</i>	<i>Phytophthor. Parasitica</i> <i>Thielaviopsis basicola</i>	<i>Gi. margarita</i> <i>G. constrictus</i> <i>G. fasciculatum</i> <i>G. intraradices</i> <i>G. mosseae</i> <i>Sclerocystis sinuosa</i>	Davis, 1980; Davis and Menge, 1981; Graham and Egel, 1988; Nemeč et al., 1996
<i>Corchorus ollitorius</i>	<i>Fusarium solani</i>	<i>G. macrocarpum</i>	Bali and Mukeerji, 1988
<i>Cucumis sativum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>cucumemmerinum</i>	Unidentified species	Dehne, 1977
<i>Cymbopogon winterianus</i>	<i>Pythium aphanidermatum</i>	<i>G. aggregatum</i>	Ratti et al., 1998
<i>Dalbergia sissoo</i>	<i>Fusarium solani</i>	<i>G. fasciculatus</i> <i>G. tenuis</i>	Chakravarty and Mishra, 1986b
<i>Daucus carota</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>chrysanthemi</i>	<i>G. intraradices</i>	Benhamou et al., 1994; St-Arnaud, Hamel, Vimard, et al., 1995

Développement

Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

<i>Dianthus caryophyllus</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>dianthi</i>	<i>G. intraradices</i>	St-Arnaud et al., 1997
<i>Elettaria cardomomum</i>	<i>Fusarium moniliformae</i>	<i>G. fasciculatum</i>	Thomas et al., 1994
<i>Euphorbia pulcherrima</i>	<i>Pythium ultimum</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. fasciculatum</i> Unidentified species	Idczak et al., 1991; Kaye et al., 1984; Stewart and Pflieger, 1977
<i>Fragaria vesca</i>	<i>Phytophthora fragariae</i>	<i>G. caledonium</i> <i>G. mosseae</i> <i>G. fistulosum</i>	Bááh and Hayman, 1983; Mark and Cassells, 1996
<i>Fragaria x ananassa</i>	<i>Phytophthora fragariae</i>	<i>G. etunicatum</i> <i>G. fasciculatum</i>	Norman et al., 1996
<i>Glycine max</i>	<i>Fusarium solani</i> <i>Macrophomina phaseolina</i> <i>Phytophthora megasperma</i> <i>P. megasperma</i> f.sp. <i>glycinea</i> <i>Pythium ultimum</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. mosseae</i> <i>G. etunicatus</i> <i>Endogone</i> sp <i>E. mosseae</i> Unidentified species	Chou and Schmitthener, 1974; Ross, 1972; Stewart and Pflieger, 1977; Whatley and Gerdemann, 1981; Zambolim and Schenck, 1981, 1983
<i>Gossypium hirsutum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>vasifactum</i> <i>Sclerocystis sinuosa</i> <i>Thielaviopsis basicola</i> <i>Verticillium dahliae</i>	<i>G. macrocarpum</i> <i>G. versiforme</i> <i>G. mosseae</i> <i>G. fasciculatus</i> <i>S. sinuosa</i>	Bali and Mukerji, 1988; Davis et al., 1979; Liu, 1995; Schönbeck and Dehne, 1977
<i>Gossypium barbadense</i>	<i>Verticillium dahliae</i>	<i>G. mosseae</i> <i>G. versiforme</i> <i>S. sinuosa</i>	Liu, 1995
<i>Hordeum</i> sp.	<i>Cochliobolus sativus</i>	<i>G. etunicatum</i>	Dehne, 1987
<i>Hordeum vulgare</i>	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	<i>G. dimorphicum</i> <i>G. intraradices</i> <i>G. mosseae</i> <i>Glomus</i> sp.	Boyetchko and Tewari, 1988, 1990

Développement Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

TABLE 3.1 (continued)

Crop species	Pathogen ^a	Mycorrhizal species ^a	References
<i>Lactuca sativa</i>	<i>Olpidium brassicae</i>	<i>G. mosseae</i> Unidentified species	Schönbeck and Dehne, 1979, 1981
<i>Linodendron tulipifera</i>	<i>Cylindrocladium scoparium</i>	Unidentified species	Barnard, 1977
<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i> <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-lycopersici</i> <i>Phytophthora nicotinae</i> f.sp. <i>parasitica</i> <i>Pyrenochaeta lycopersici</i> <i>Pythium aphanidermatum</i> <i>Verticillium albo-atrum</i> <i>Verticillium dahliae</i>	<i>G. caledonium</i> <i>G. etunicatum</i> <i>G. intraradices</i> <i>G. mosseae</i> Unidentified species	Bååth and Hayman, 1983; Bochow and Abou-Shaar, 1990; Caron et al., 1985, 1986a, 1986b, 1986c, Caron et al., 1986; Dehne and Schönbeck, 1975, 1979a; Jalali and Hisar, 1991; Karagiannidis et al., 2002; Lioussanne et al., 2003; McGraw, 1983; McGraw and Schenck, 1981; Nemeč et al., 1996; Pozo et al., 1996; Ramaraj et al., 1988
<i>Linum usitatissimum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>lini</i>	<i>G. intraradices</i>	Dugassa et al., 1996
<i>Medicago sativa</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Medicaginis</i> <i>Phytophthora megasperma</i> <i>Pythium paraecandrum</i> <i>Verticillium albo-atrum</i>	<i>G. fasciculatus</i> <i>G. mosseae</i> <i>Glomus</i> sp.	Davis et al., 1978; Hwang, 1988; Hwang et al., 1992
<i>Musa acuminata</i>	<i>Cylindrocladium spathiphylli</i>	<i>Glomus</i> sp.	Declerck et al., 2002
<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Olpidium brassicae</i> <i>Pythium</i> sp. <i>Thielaviopsis basicola</i>	<i>G. microcarpum</i> <i>G. monosporum</i> <i>G. mosseae</i> Unidentified species	Baltruschat and Schönbeck, 1972; 1975; Giovannetti et al., 1991; Jalali and Hisar, 1991; Schönbeck and Dehne, 1979; Tosi et al., 1988

Développement

Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

<i>Onobrychis viciifolia</i>	<i>Pythium</i> spp.	<i>G. fasciculatus</i> <i>G. intraradices</i>	Hwang et al., 1993
<i>Persea Americana</i>	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	<i>G. fasciculatus</i>	Davis et al., 1978; Mataré and Hattingh, 1978
<i>Pisum sativum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. mossae</i>	Morandi et al., 2002
<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Fusarium solani</i> <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>phaseoli</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. intraradices</i> <i>G. macrocarpum</i>	Filion et al., 2003b; Gonçalves et al., 1991a, 1991b; Guillon et al., 2002
<i>Pisum sativum</i>	<i>Aphanomyces euteiches</i>	<i>G. fasciculatum</i> <i>G. intraradices</i> <i>G. mosseae</i> Wild inoculum	Bødker et al., 2002; Kjølner and Rosendahl, 1996; Larsen and Bødker, 2001; Rosendahl, 1985
<i>Poncirus trifoliata</i> X <i>Citrus sinensis</i>	<i>Phytophthora parasitica</i>	<i>Gi. Margarita</i> <i>G. constrictus</i> <i>G. fasciculatus</i> <i>G. mosseae</i> <i>S. sinuosa</i>	Davis and Menge, 1981
<i>Prunus persica</i>	<i>Cylindrocarpon destructans</i>	<i>G. aggregatum</i> <i>G. intraradices</i>	Traquair and Pohlman, 1990; Traquair, 1995
<i>Solanum melongena</i>	<i>Verticillium dahliae</i>	<i>Gi. Etunicatum</i> <i>G. mosseae</i>	Karagiannidis et al., 2002; Matsubara et al., 1995
<i>Tagetes patula</i>	<i>Pythium ultimum</i>	<i>G. intraradices</i>	St-Arnaud, 1998; St-Arnaud et al., 1994
<i>Tagetes erecta</i>	<i>Pythium ultimum</i>	<i>G. mosseae</i>	Calvet et al., 1993
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Ganoderma pseudoferreum</i>	Unidentified species	Chulan et al., 1990
<i>Trifolium</i> sp.	<i>Fusarium avenaceum</i>	Unidentified species	Cole and Lim in Dehne, 1982



Développement Stress pathogènes

- Relations bien documentées dans la littérature

TABLE 3.1 (continued)

Crop species	Pathogen ^a	Mycorrhizal species ^a	References
<i>Triticum aestivum</i>	<i>Cochliobolus sativus</i> (= <i>Bipolaris sorokiana</i>) <i>Gaeumannomyces graminis tritici</i>	<i>G. fasciculatus</i> <i>G. intraradices</i>	Graham and Menge, 1982; Rempel, 1989
<i>Triticum</i> sp.	Root infecting fungi	Unidentified species	Mahmood and Khurshid, 1988
<i>Vigna radiata</i>	<i>Macrophomina phaseolina</i>	<i>G. coronatum</i> <i>G. mosseae</i>	Jalali and Hisar, 1991; Kasiamdari et al., 2002
<i>Vigna unguilata</i>	<i>Macrophomina</i> sp. <i>Phytophthora vignae</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. clarum</i> <i>G. etunicatum</i> <i>G. intraradices</i>	Abdel-Fattah and Shabana, 2002; Ramaraj et al., 1988; Fernando and Linderman, 1997
<i>Vulpia ciliata</i> ssp. <i>Ambigua</i>	<i>Embellisia chlamydospora</i> <i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Glomus</i> sp.	Newsham et al., 1994, 1995
<i>Zea mays</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>G. mosseae</i>	Khadge et al., 1990
37 pasture species	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	Wild inoculum	Thompson and Wildermuth, 1989

^aSpecies names are those used in the cited references.

Source : St-Arnaud M. et Vujanovic V. 2007. Effect of the Arbuscular Mycorrhizal symbiosis on Plant Diseases and Pests, p. 67 – 122, dans C. Hamel et C. Plenchette, eds. Mycorrhizae in crop production. Haworth Press, Binghampton, New York.



Développement Stress pathogènes

Effets des mycorhizes sur les maladies racinaires

- Réduction des symptômes de la maladies
 - Exemple : Réduction de la nécrose des racines après l'infection de *Fusarium oxysporum sp.* chez la tomate, même si l'inoculation par la mycorhize se fait 4 semaines après l'infection au pathogène. (Caron et al.)
- Réduction de la mortalité par la maladie
 - Exemple : réduction de 77% (*Glomus etunicatum*) et 29% (*Glomus intraradices*) de mortalité chez la pomme de terre infecté de *Rhizoctonia solani*
- Réduction des propagules dans le sol
 - Exemple : 10 fois moins de propagule de *Pythium* dans un sol mycorhizé (*Glomus intraradices*) (Yao et al. 2002)
- Germination suicidaire des spores de *Fusarium oxysporum chrysanthemi* (St-Arnaud et al. 1995)



Développement
Stress pathogènes
Germination suicidaire

Étude de M. St-Arnaud et al. 1995 sur la germination de *Fusarium oxysporum chrysanthemi* en présence de *Glomus intraradices*

Experiment	Concentration ($\times 10^4$)	Conidia germination			
		Control		<i>G. intraradices</i>	
		%	SD	%	SD
1	15	41.8	9.3	87.2	6.5
2	12	22.2	8.9	55.4	6.8
3	130	13.1	9.1	43.4	6.7
4	83	47.3	6.2	71.5	8.6
Pooled		31.2 a	16.5	64.7 b	18.2

Tiré de St-arnaud et al. 1995)



Développement Stress pathogènes

Effets des mycorhizes sur les nématodes

- Parmi les expériences sur les relations entre les nématodes et les mycorhizes, malgré l'augmentation de nématodes dans certaines recherches, la biomasse de la plante était supérieure chez les plantes mycorhizées
- Certaines plantes mycorhizées, comme la papaye ou le trèfle, démontraient 37% et 68% de réduction de dommages par les nématodes *Meloidogyne javanica* et *Meloidogyne incognita*
- Réduction du nombre de nématodes (*Pratylenchus penetrans*) dans le sol jusqu'à 49% chez la carotte. (carotte fourchue)



Stress par les herbivores



Développement

Stress par les herbivores

Défense anti-herbivore pré-activés par l'inoculation de *Glomus mosseae* et sa participation dans le sentier du jasmonate chez la tomate. (Song et al. 2013)

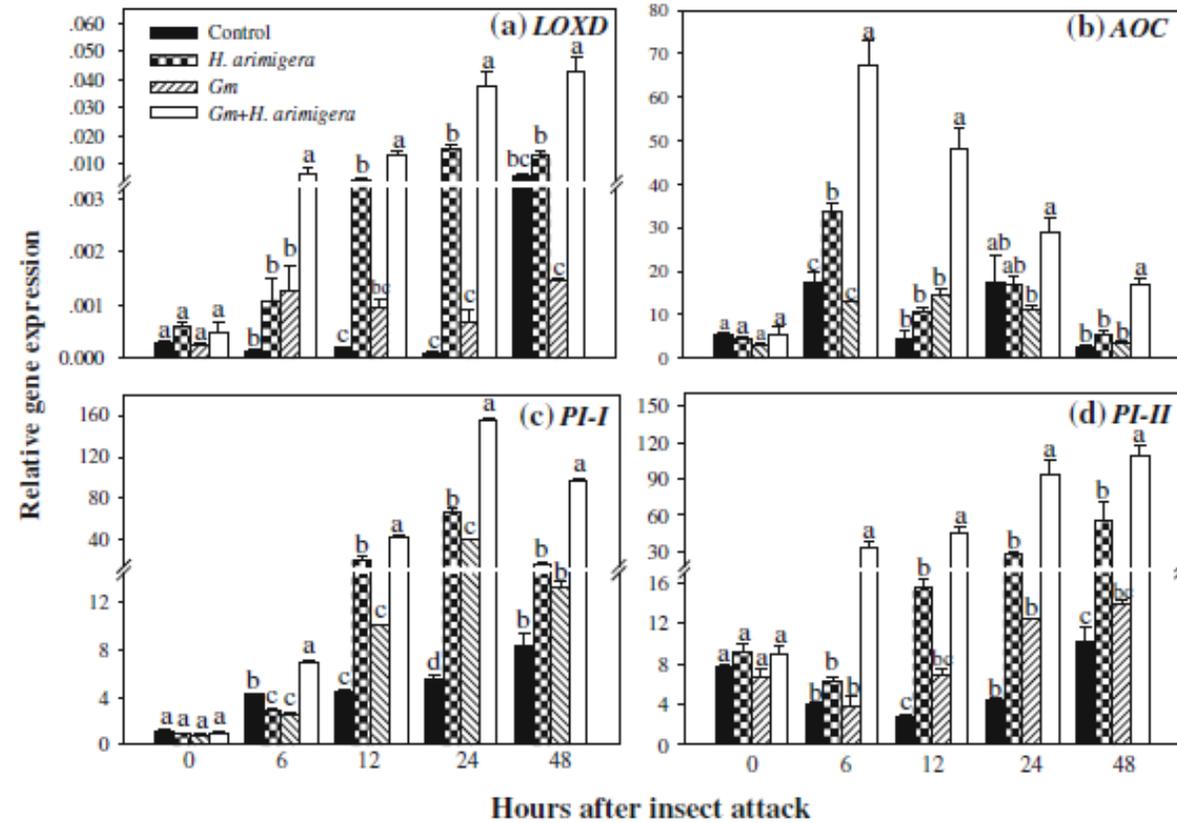
- 4 génotypes de tomates
 - WT = sauvage
 - JA = mutant qui ne produit pas de jasmonate
 - JAIL= mutant insensible par les jasmonates
 - 34S::PS = mutant qui surexprime les effets des jasmonates
- Insecte : *Helicoverpa arimigera* (lepidoptère, noctuidae) (noctuelle de la tomate)
- 50% mycorhizés par *Glomus mosseae*
- Évaluation des dégats foliaires
- Évaluation du poids des larves
- Évaluation de l'expression des gène impliqués



Développement Stress par les herbivores

Défense anti-herbivore pré-activés par l'inoculation de *Glomus mosseae* et sa participation dans le sentier du jasmonate chez la tomate.

Résultats



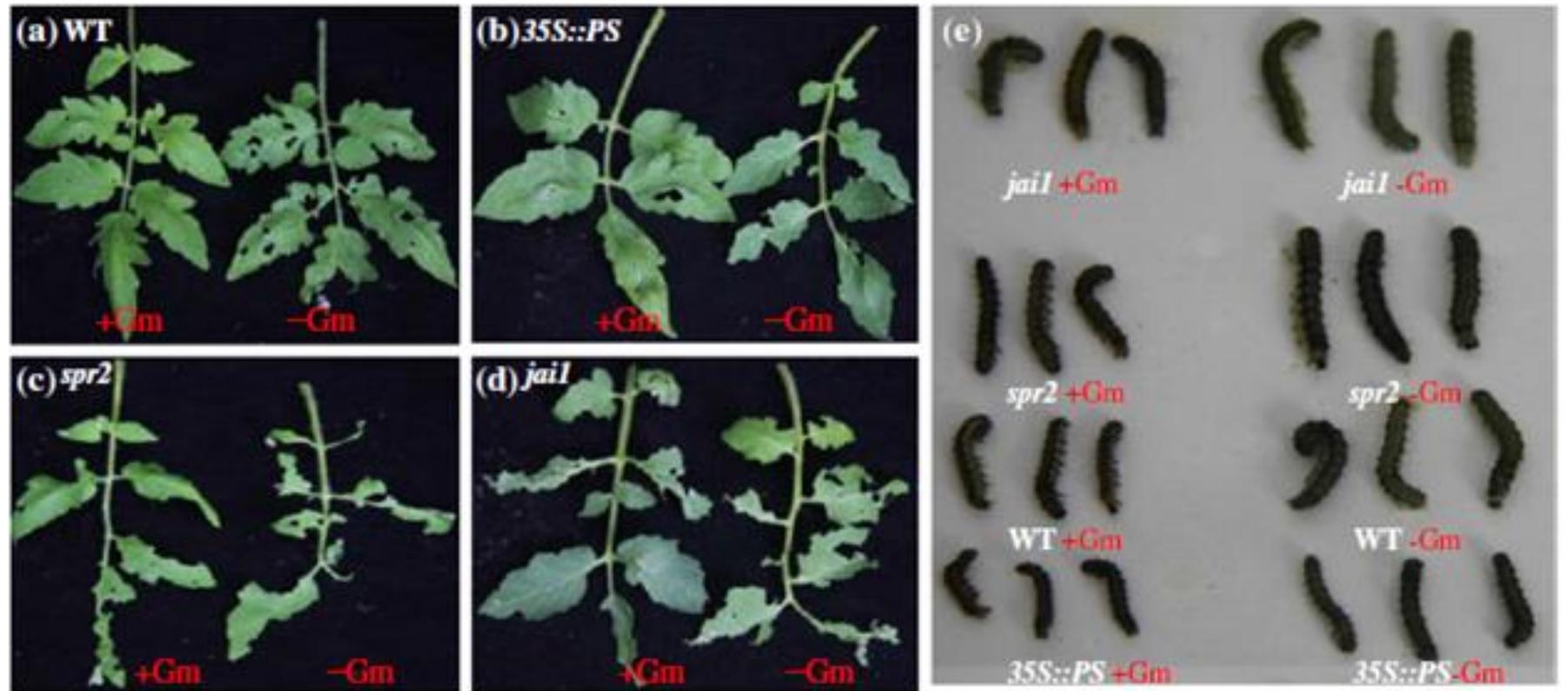
Tiré de Song et al. 2013



Développement Stress par les herbivores

Défense anti-herbivore pré-activés par l'inoculation de *Glomus mosseae* et sa participation dans le sentier du jasmonate chez la tomate.

Résultats



Tiré de Song et al. 2013



Développement Stress par les herbivores

Défense anti-herbivore pré-activés par l'inoculation de *Glomus mosseae* et sa participation dans le sentier du jasmonate chez la tomate.

Résultats

Tomato line	AMF inoculation	Mycorrhizal colonization (%)		HA larval weight gain (mg)
		HA-treated	HA-untreated	HA-treated
WT	Gm	53.8±3.2 a	50.8±1.7 a	40.6±2.8 c
	un-inoculated	–	–	65.9±7.0 b
35S::PS	Gm	50.4±1.5 a	52.6±2.8 a	27.1±2.3 c
	un-inoculated	–	–	48.2±1.6 b
spr2	Gm	15.8±1.4 b	16.6±1.6 b	111.4±4.1 a
	un-inoculated	–	–	115.1±7.5 a
jai1	Gm	47.2±3.3 a	46.2±3.3 a	119.4±5.1 a
	un-inoculated	–	–	121.9±5.2 a

Third instar larvae of *H. arimigera* was used to attack tomato plants (WT, 35S::PS, spr2, jai1). Four sets of bioassays were independently carried out and three pots per treatment were set up for each set of bioassays. Values are means ± standard error. Significant differences ($P < 0.05$ using Tukey post-hoc test) among treatments in the same column are indicated by different letters

Source : Yuan Yuan Song, Mao Ye, Chuan You Li, Rui Long Wang, Xiao Chen Wei, Shi Ming Luo, Ren Sen Zeng. 2013. Priming of Anti-Herbivore Defense in Tomato by Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Involvement of the Jasmonate Pathway. Journal of chemical ecology, vol. 39, 2013, 1036 – 1044.



Développement

Stress par les herbivores

Défense anti-herbivore pré-activés par l'inoculation de *Glomus mosseae* et sa participation dans le sentier du jasmonate chez la tomate.

Résultats

- L'inoculation par *Glomus mosseae* a induit une réaction de défense plus rapide et plus fortement à comparer aux plants non inoculés suite aux attaques des larves.
- L'étude poursuit en disant que la pré-activation de la défense de la plante par la mycorhize est un facteur clé dans la réponse de celle-ci aux attaques des larves.
- Les feuilles ont été moins attaqués par les larves lorsque le plant était traité par *G. mosseae*.



Signaux inter-plantes



Développement Stress par les herbivores

Communication entre les plants par les réseaux commun de mycélium

- Réseau qui connecte tous les plants mycorhizés dans un même champs
- Des nutriments, composés chimiques et même des signaux électriques peuvent voyager dans les hyphes
- Ces réseaux pourraient transporter des signaux permettant d'alerter les plants voisins, sans avoir à sécréter des composés organiques volatils. (CBC)
- Les défenses de la plante dues aux attaques par des insectes pourraient alors être induites systématiquement à tout le champs.

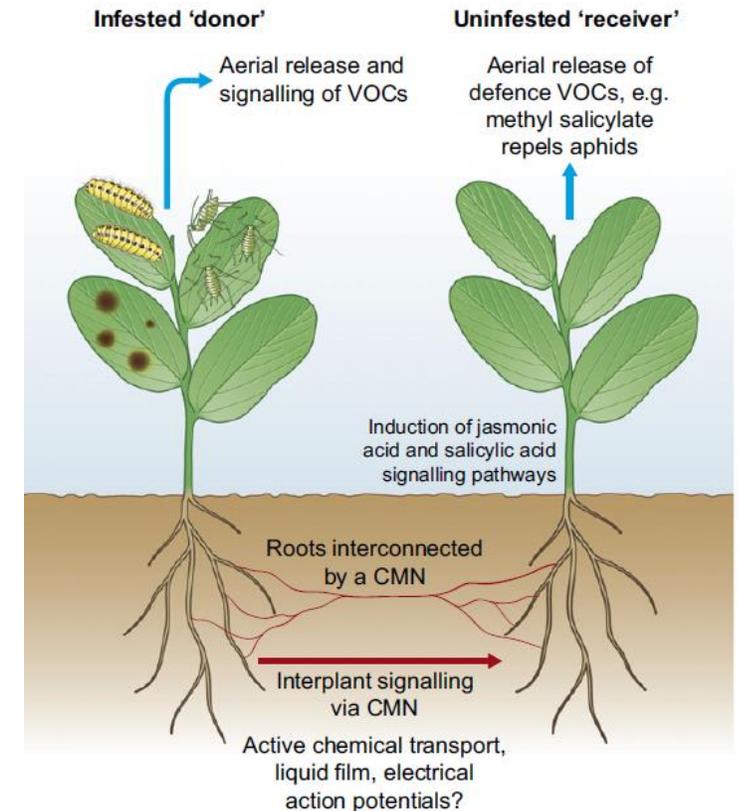
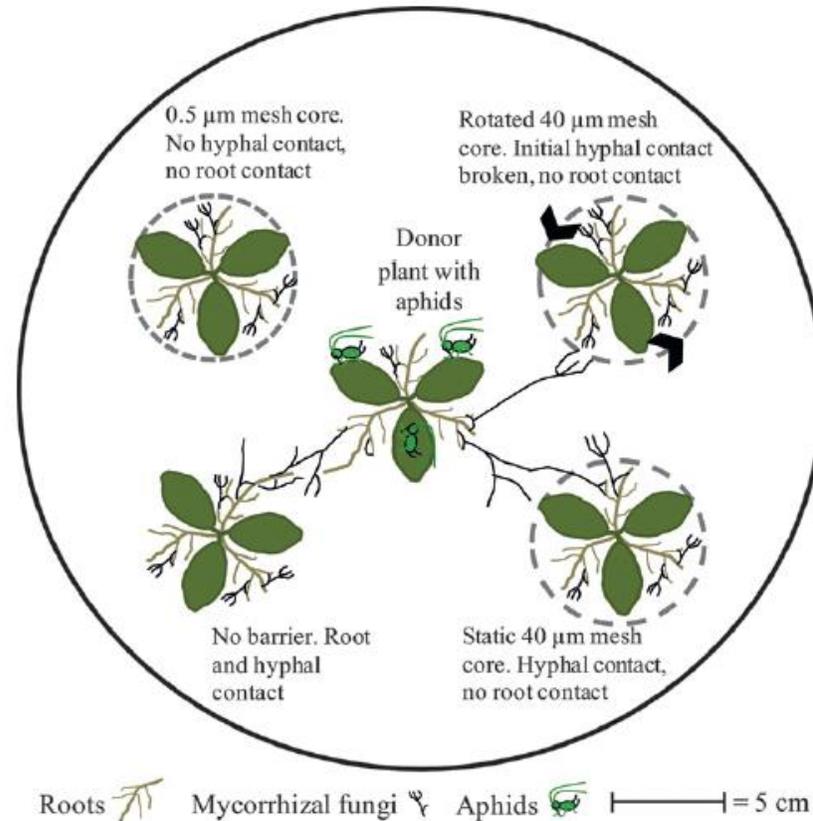


Image tiré de (Johnson et al. 2014)



Développement Stress par les herbivores

Communication entre les plants par les réseaux commun de mycélium



- Les plants ont tous été placés sous un sac de polyéthylèneterephthalate pour éviter tout transfert de composé volatil du plant hôte
- Une évaluation de l'air de chaque plant a été fait afin de calculer les composés organiques volatils

Tiré de Babikova et al. (2013)



Développement Stress par les herbivores

Communication entre les plants par les réseaux commun de mycélium

Résultats

- Première étude a démontré hors de tout doute le transfert de molécules de signaux par les hyphes.
- Une production de salicate de méthyle (répulsion des pucerons) plus importante dans le cas des plants mycorhizés connectés.



Développement Stress par les herbivores

Communication entre les plants par les réseaux commun de mycélium

- Une étude de Song et al. (2014) a démontré ce système de communication dans le cas d'attaques de *Spodoptera litura* chez la tomate.
- D'autres études ont démontré ce système avec les pathogènes, dont *Alternaria solani* chez la tomate, qui ont induit la transcription systématique de six gènes de défense. (Song et al. 2010)



Conclusion

Résumé

- Les mycorhizes aident la défense de la plante lors de condition de stress:

Hydrique en :

- Augmentant l'efficacité du photosystème II
- Augmentant le contenu d'eau relatif
- Modifiant les proportions de flux apoplastique et symplastique de l'eau
- Augmentant le potentiel hydrique des feuille
- Augmentant ou diminuant les aquaporines dans les membranes cellulaire racinaires

Salin en :

- Augmentant la quantité de nutriments (P, K, Ca, Mg, Zn, Cu et Mn)
- En diminuant la quantité de Na absorbée

Par des phytopathogènes en:

- Activant le système de défense de la plante lors de la pénétration des hyphes mycorhiziens
- Améliorant le temps de réponse de la plante
- Réduisant le nombre de propagules du phytopathogène
- Signalant aux autres plantes plus rapidement la présence d'organismes néfastes

Par des herbivores en:

- Activant le système de défense de la plante lors de la pénétration des hyphes mycorhiziens
- Améliorant le temps de réponse de la plante
- Signalant aux autres plantes plus rapidement la présence d'organismes néfastes



Conclusion

Retour sur l'hypothèse

L'ajout de mycorhizes en agriculture permet à la plante de réduire l'incidence des stress biotiques et abiotiques.

Réponse : Oui

Mais...



Conclusion

Ouverture sur le sujet

- Recherche en champs, suivi agronomique à faire...
- Adapter les prescriptions de fertilisation, en tenant compte des mycorhizes (très complexe)
- Plus de partages d'informations dans nos universités, DEC, ITA, ministères...
- Glomaline
- Phytopathologie

Les mycorhizes en chiffres :

- 300 000 ha en 2016
- 400 000 ha prévu pour 2017
- 1 000 000 ha prévu pour 2019
- 100\$-300\$ gain net/ha (inoculum payé)
- ~60\$/ha

Conclusion

Sources

- Marcel G. A. van der Heijden, John N. Klironomos, Margot Ursic, Peter Moutoglis, Ruth Streitwolf-Engel, Thomas Boller, Andres Wiemken & Ian R. Sanders. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396, 69-72.
- Gloria Barzana, Ricardo Aroca, José Antonio Paz, François Chaumont, Mari Carmen Martínez-Ballesta, Micaela Carvajal et Juan Manuel Ruiz-Lozano. 2012. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. *Annals of Botany*, 109, 1009 – 1017.
- Xian-Can Zhu, Feng-Bin Song, Sheng-Qun Liu et Tie-Dong Liu. 2011. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on photosynthesis and water status of maize under high temperature stress. *Plant Soil*, 346, 189 – 199.
- Walter Chitarra, Chiara Pagliarani, Biancaelena Maserti, Erica Lumini, Ilenia Siciliano, Pasquale Cascone, Andrea Schubert, Giorgio Gambino, Raffaella Balestrini, et Emilio Guerrieri. 2017. Insights on the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis on Tomato Tolerance to Water Stress. *Plant Physiology*, 171, 1009 – 1023.
- Taliha Uysal Boyacıoğlu et Refik Uyanöz. 2014. Effects of mycorrhizal fungi on tolerance capability of corn grown under salt stress condition. *Journal of Plant nutrition*, 37, 107 – 122.
- Sabine C. Jung, Ainhoa Martínez-Medina, Juan A. López-Raéz et Maria J. Pozo. 2012. Mycorrhiza-Induced Resistance and Priming of Plant Defenses. *Journal of chemical ecology*, 38, 651 – 664.
- B.N. Chakraborty* and U. Chakraborty. 2012. Molecular identification, recognition, cell defense response and agricultural importance of AM fungi. *Plant Pathology*, Vol. 5, 2012, 57 – 96.
- Marc St-Arnaud et Vladimir Vujanovic. 2007. Effect of the Arbuscular Mycorrhizal symbiosis on Plant Diseases and Pests, p. 67 – 122, dans C. Hamel et C. Plenchette, eds. *Mycorrhizae in crop production*. Haworth Press, Binghamton, New York.
- Laëtizia Lioussanne, François Perreault, Mario Jolicoeur et Marc St-Arnaud. 2010. The bacterial community of tomato rhizosphere is modified by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi but unaffected by soil enrichment with mycorrhizal root exudates or inoculation with *Phytophthora nicotianae*. *Soil biology and biochemistry*, 42, 2010, 473 – 483.
- Yuan Yuan Song, Mao Ye, Chuan You Li, Rui Long Wang, Xiao Chen Wei, Shi Ming Luo, Ren Sen Zeng. 2013. Priming of Anti-Herbivore Defense in Tomato by Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Involvement of the Jasmonate Pathway. *Journal of chemical ecology*, vol. 39, 2013, 1036 – 1044.

Merci!