

Les microorganismes du sol : des outils biologiques pour satisfaire les objectifs du développement durable (ODD)

Par Jean-Marc CHÂTAIGNER

Directeur général délégué de l'IRD

et Robin DUPONNOIS

Directeur du Laboratoire des Symbioses tropicales & méditerranéennes

De nombreuses pratiques agricoles classiques se révèlent aujourd'hui irrespectueuses de l'environnement et ont largement montré leurs limites dans l'atteinte de l'objectif de sécurité alimentaire aujourd'hui clairement défini au sein du deuxième Objectif de développement durable (ODD 2) de l'Agenda 2030 des pays membres de l'ONU. Dans l'urgence actuelle de trouver des moyens pour atténuer le changement climatique, et surtout, de s'adapter à ses effets, des voies novatrices doivent être empruntées afin de concilier de notables augmentations des rendements et la conservation des ressources naturelles. Les outils biologiques tels que les microorganismes du sol constituent une réponse permettant d'atteindre les objectifs du développement durable. Dans cet article, nous proposons, à travers l'exemple des champignons mycorhiziens, une analyse de ces outils biologiques comme solutions universelles à l'atteinte des objectifs précités.

Le concept de « révolution verte », né dans les années 1960, avait pour origine la volonté affirmée d'optimiser la production agricole sur l'ensemble de la planète en recourant à toutes les technologies agricoles susceptibles d'améliorer la productivité des agrosystèmes. L'objectif principal de ce transfert de technologies était d'assurer la sécurité alimentaire des populations, en particulier celles des pays en voie de développement (FREEBAIM, 1995).

Malgré des résultats très positifs en termes d'amélioration du rendement des principales espèces cultivées (maïs, blé, riz, etc.) et de lutte contre l'insécurité alimentaire reconnus dans les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)⁽¹⁾, ces pratiques agricoles intensives ont engendré de nombreux problèmes environnementaux et sociaux.

En effet, l'utilisation excessive de pesticides et d'engrais chimiques, la surexploitation des ressources naturelles et l'uniformisation des itinéraires culturels ont entraîné des pertes majeures de biodiversité et d'agro-biodiversité. De plus, ce schéma a provoqué des mouvements migratoires vers les mégapoles (en particulier dans les pays du Sud), amplifiant ainsi les poches de pauvreté et d'insécurité

dans ces milieux urbains. Autrement dit, ce modèle a participé à la hausse des inégalités entre les pays et au sein même des pays, évolution négative que tente aujourd'hui de freiner le dixième objectif de développement durable (ODD 10) de l'Agenda onusien. L'approche transversale et interdisciplinaire défendue par l'Agenda 2030 à travers ses 17 ODD résulte de la convergence entre les agendas de lutte contre le changement climatique et les agendas de lutte contre la pauvreté.

Après la prise de conscience des dégradations notoires découlant de ces pratiques culturelles irrespectueuses de l'environnement, le développement de règles définissant une agriculture durable prenant en compte les ressources naturelles et l'environnement social du milieu considéré a été engagé donnant naissance au concept de « Révolution doublement verte ». Cette vision de l'agriculture de demain plonge principalement ses racines dans la définition du deuxième objectif de développement durable (ODD 2), qui a pour ambition de mettre un terme à la faim

(1) Voir http://www.un.org/fr/millenniumgoals/reports/2015/pdf/rapport_2015.pdf

et à la malnutrition sous toutes leurs formes d'ici à 2030, en encourageant, en particulier, des pratiques agricoles durables et en permettant une égalité d'accès aux technologies.

En conséquence, des solutions doivent être identifiées de manière urgente afin de nourrir une population actuelle de 7 milliards d'êtres humains (qui devrait atteindre les 9 milliards en 2050). La productivité des agrosystèmes doit connaître une augmentation significative, en particulier dans les pays des zones tropicales et subtropicales reconnues comme les zones les plus vulnérables aux phénomènes liés au changement climatique (The Future of Farming, 2011). Les pratiques agricoles classiques ne satisfaisant pas aux critères de durabilité et de respect de l'environnement, il est nécessaire de s'engager dans des voies novatrices afin de concilier des augmentations de rendement notables et une conservation des ressources naturelles.

Il est reconnu que les savoir-faire traditionnels en termes de pratiques agricoles (cultures mixtes, rotation culturale, pratique du *zai*, etc.) sont particulièrement adaptés aux conditions environnementales et sociales variées dans lesquelles ils sont pratiqués, mais qu'ils ne suffisent plus à assouvir les besoins alimentaires d'une population en constante évolution. Cette inadéquation résulte principalement d'une surexploitation des ressources minérales telluriques aboutissant à des carences en macroéléments, tels que le phosphore et l'azote.

Or, les acquis scientifiques obtenus au cours de ces dernières décennies ont montré que le sol hébergeait une diversité encore sous-estimée de microorganismes susceptibles d'améliorer durablement la fertilité des sols et, ainsi, d'augmenter la productivité des agrosystèmes. De plus, de nombreuses études ont clairement décrit le rôle prépondérant de certaines composantes microbiennes du sol (comme les champignons mycorhiziens et leurs communautés microbiennes associées) dans les processus biologiques régissant l'évolution spatio-temporelle des écosystèmes terrestres (processus de facilitation, effet « *Plant-Soil Feedback* »...).

Il a donc été suggéré qu'une des voies d'action possibles pour identifier des pratiques culturales performantes et durables pourrait consister à intégrer ces processus biologiques dans des itinéraires culturaux en facilitant le développement et l'activité de certains microorganismes du sol, comme les champignons mycorhiziens qui forment une association symbiotique avec les plantes.

Les champignons mycorhiziens

Les champignons mycorhiziens (CM) sont des microorganismes ubiquistes présents dans les agroécosystèmes terrestres. Ils forment des associations symbiotiques avec la majorité des espèces végétales (en particulier avec les plantes de grande culture), en facilitant la nutrition minérale de la plante hôte et, en retour, en étant alimentés par les composés carbonés issus de la photosynthèse de la plante associée. Ces symbiotes fongiques améliorent particulièrement la nutrition en phosphore de la plante (le

déficit en phosphore étant la principale carence minérale à être observée dans les sols des régions méditerranéennes et tropicales). Par ailleurs, ils agissent également contre l'impact de certains microorganismes phytopathogènes (SMITH et READ, 2008). Enfin, ils sont particulièrement impliqués dans les mécanismes biologiques assurant la productivité et la stabilité des écosystèmes (SMITH et READ, 2008).

La symbiose mycorhizienne

Les mycorhizes sont des unions durables basées sur des échanges réciproques de métabolites entre les racines des végétaux et certains champignons présents dans le sol. Le nouvel organe mixte est formé de tissus de la plante hôte et du champignon mycorhizien (ou symbiote fongique) et chaque partenaire optimise son développement grâce à cette symbiose. Ces champignons sont présents dans la majorité des écosystèmes terrestres (on les qualifie d'ubiquistes) et les racines de plus de 80 % des espèces de plantes vasculaires présentent (ou sont susceptibles de présenter) des symbioses mycorhiziennes. La présence de mycorhizes est donc un phénomène général chez les plantes. Le potentiel mycorhizien des sols est constitué par un ensemble de propagules fongiques qui sont soit des spores, soit des hyphes, soit des fragments de racines mycorhizées.

Les propriétés potentielles de ce type de microorganisme symbiotique ont naturellement entraîné un nombre important de recherches visant à comprendre et à optimiser le fonctionnement de ces symbioses afin d'améliorer la productivité et la stabilité du couvert végétal (365 articles portant sur la symbiose mycorhizienne ont été publiés en 2015, selon la base *ISI Web of Science*).

Ce type de champignon étant un microorganisme symbiotique strict, la présence de la plante hôte est nécessaire pour assurer sa multiplication et donc pour produire des inoculants mycorhiziens susceptibles d'être mélangés au sol de culture et ainsi de l'enrichir en propagules fongiques.

De nombreuses techniques de multiplication ont été élaborées *via* des procédés culturaux sur sol stérilisé à la vapeur, des cultures hydroponiques ou des cultures dans des conditions axéniques (IJDO et al., 2011). Toutefois, force est de constater que ces approches ne sont pas compatibles dans le cadre d'une utilisation à grande échelle de ce type de biofertilisant.

Toutefois, cette technologie peut être envisageable avec une espèce de symbiote fongique, *Rhizophagus irregularis*, qui est connu pour sa distribution ubiquiste à travers différents types de sol de la planète. Ce symbiote fongique présente plusieurs spécificités, en particulier celle d'être cultivable *in vitro* en présence de racines transformées par *Agrobacterium tumefaciens* et de produire ainsi un inoculant fongique de très haute qualité dans des conditions compatibles avec la réalité des marchés ciblés.

Variétés de blé dur	Pays	Espèce	Biomasse	Rendement en grain	Références
Wheat cv. TAM-105	Iran	Glomus etunicatum Glomus mosseae	+ 21,6 % + 6,2 %	+ 41,4 % 0	Al-Karaki et al. (2004)
Wheat cv. Steardy	Iran	Glomus etunicatum Glomus mosseae	+ 31,6 % 0	+ 41,8 % 0	Al-Karaki et al. (2004)
Wheat cv. Tetra	Mali	Glomus intraradices	+ 22,1 %	+ 22,4 %	Babana et al. (2006)
Unknown	Inde	Glomus fasciculatum	+ 77,9 %	+ 55,5 %	Khan & Zaidi (2007)
Wheat cv. UP-2338	Inde	Complexe mycorrhizien	nd (1)	+ 81,0 %	Mader et al. (2011)
Wheat cv HD 2643	Inde	Glomus fasciculatum	nd (1)	+ 21,2 %	Mahanta et al. (2014)
Wheat cv WH 147 x WH 533	Inde	Glomus fasciculatum	+ 8,7 %	+ 18,1 %	Singh et al. (2004)
Wheat cv WH 533 x Raj 3077	Inde	Glomus fasciculatum	+ 5,5 %	+ 12,3 %	Singh et al. (2004)
Unknown	Inde	Glomus mosseae	+ 15,7 %	+ 12,6 %	Suri et al. (2011)
Unknown	Inde	Glomus intraradices	+ 15,4 %	+ 13,4 %	Suri et al. (2011)

Tableau 1 : Effet de l'inoculation mycorrhizienne sur le développement et le rendement du blé dur.
(1) nd : non déterminé.

Ce champignon mycorrhizien constitue la base de nombreux biofertilisants mycorrhiziens qui sont proposés par plusieurs groupes internationaux du secteur des produits phytosanitaires.

Toutefois, ce type de produit intéresse essentiellement des marchés de niche dans les pays développés et il est malheureusement encore peu diffusé dans les pays des régions tropicales et méditerranéennes, où, pourtant, toutes les conditions environnementales et économiques sont réunies (carence des sols en phosphore, coût élevé des intrants, etc.) pour que la symbiose mycorrhizienne trouve sa pleine expression en termes d'amélioration des rendements des périmètres cultivés.

Des stratégies pour valoriser la symbiose mycorrhizienne

Les interventions pour améliorer la diversité et l'abondance des propagules fongiques dans le sol (potentiel infectieux mycorrhizogène – PIM) ne sont pas anodines et elles doivent être raisonnées en fonction de la composition des communautés mycorrhiziennes des sols à traiter. En effet, plusieurs stratégies peuvent être envisagées, à savoir :

- une approche, dite « réductionniste », consistant à introduire dans le substrat de culture des propagules fongiques d'une souche sélectionnée en fonction d'un paramètre donné (par exemple, son effet sur la croissance de la plante). Cette approche est privilégiée lorsque le niveau du PIM est considéré comme insuffisant pour avoir un effet significatif sur le rendement des cultures.
- une approche, dite « holistique », qui a pour ambition d'améliorer le PIM *via* la mise en place d'un couvert végétal et d'un itinéraire cultural adéquats pour promouvoir la multiplication des symbiotes fongiques du sol.

De nombreuses études ont montré l'intérêt d'introduire des propagules fongiques dans les périmètres cultivés pour améliorer le rendement d'espèces de grande culture (comme le maïs, le blé, etc.) (voir le Tableau 1 ci-dessus). Malgré des effets significatifs et parfois spectaculaires, cette technologie reste encore peu utilisée dans le monde agricole et est pratiquement ignorée dans les pays du Sud.

À l'heure actuelle, en fonction du niveau de connaissances acquis sur ce processus biologique, une des approches parmi les plus prometteuses consiste à intégrer la dimension « symbiose plante/microorganismes » dans l'élaboration d'itinéraires culturaux innovants, en évitant l'introduction en masse d'une souche fongique.

Cette démarche s'appuie sur les savoir-faire traditionnels en agriculture (jachères améliorées, cultures mixtes, agroforesterie, rotations culturales). Si ceux-ci sont parfaitement adaptés aux conditions environnementales locales, ils ne prennent cependant pas en compte le rôle potentiel de la symbiose mycorrhizienne dans la productivité et la capacité de résilience de l'agrosystème. En utilisant les données scientifiques acquises sur les facteurs biotiques et abiotiques influençant la multiplication des propagules fongiques dans le sol et leur efficacité sur le développement de la plante, il est possible d'augmenter le PIM en manipulant la composition du couvert végétal.

Il a été parfaitement démontré que le développement des légumineuses était hautement dépendant de la symbiose mycorrhizienne (WAHBI et al., 2014). Ainsi, de nombreux travaux ont mis en évidence l'impact positif sur le PIM de systèmes de co-culture ou de rotations culturales « légumineuses/céréales » aboutissant à une amélioration de la croissance des espèces ciblées, en l'occurrence le blé dur (WAHBI et al., 2016) (voir le Tableau 2 de la page suivante).

Au sein d'une rotation culturale, la mise en place d'un couvert de légumineuses polyspécifiques optimisera l' « effet légumineuse » sur le PIM et, par voie de conséquence, l'impact de la symbiose mycorhizienne sur le développement de la culture suivante (DUPONNOIS, communication personnelle). Ces approches sont relativement performantes en termes d'amélioration de la productivité de la céréale associée, qui, pourtant, n'a pas été sélectionnée en raison de sa dépendance à la symbiose mycorhizienne. Ainsi, sélectionner des variétés de blé présentant une haute dépendance mycorhizienne pourra permettre d'optimiser l'impact de ces pratiques sur le rendement de la culture considérée.

Conclusion

Au même titre que d'autres microorganismes du sol connus pour leur effet promoteur de la croissance des plantes, les champignons mycorhiziens rassemblent de nombreuses propriétés susceptibles de contribuer à l'atteinte de certains ODD. Les principaux ODD concernés visent la garantie de la sécurité alimentaire et la promotion de l'agriculture durable (ODD 2) et la lutte contre les changements climatiques et leurs répercussions (ODD 13). Surtout, les enjeux que portent ces microorganismes du sol couvrent aussi les objectifs de promotion de la santé et du bien-être par la mise en œuvre de pratiques culturales adaptées se substituant à l'utilisation de produits phytosanitaires nocifs pour l'homme (ODD 3), de préservation des écosystèmes terrestres en considérant le sol

comme une ressource vitale non renouvelable (ODD 15) et également de lutte contre la pauvreté multidimensionnelle (ODD 1) et les inégalités, tant à l'échelle internationale qu'aux échelles nationale, régionale et locale (ODD 10).

Dès lors, ces microorganismes du sol pourraient participer à l'atteinte des deux finalités du programme de développement durable : la lutte contre la pauvreté, d'une part, et l'atténuation et l'adaptation aux phénomènes du changement climatique, d'autre part.

Pour y parvenir, la gestion de la symbiose mycorhizienne doit être raisonnée et doit prendre en compte les acquis scientifiques relatifs aux mécanismes microbiens régissant la fertilité des sols.

Par ailleurs, les sélectionneurs de variétés de céréales auront dans un avenir proche à intégrer à leur programme de sélection la réponse de telle ou telle variété à l'association mycorhizienne afin que la variété considérée puisse bénéficier au mieux d'une augmentation du PIM. Pour cela, scientifiques, acteurs économiques et décideurs politiques doivent pouvoir travailler ensemble de manière ciblée et dans une approche transdisciplinaire sur les moyens à déployer pour atteindre les ODD.

Plus généralement, l'appropriation des ODD par les pays les plus vulnérables à la menace globale du changement climatique nécessite de renforcer et d'autonomiser leurs communautés scientifiques en favorisant les coopérations régionales Sud/Sud et la coopération tripartite (ODD17).

	Treatments					
	2012			2013		
	W	WF	W+F	W	WF	W+F
Biomasse totale (kg.ha ⁻¹)	4662 (78,5) (1) a (2)	3897 (49,3) a	-	4434 (66,1) a	8167 (97,3) b	5038 (94,6) a
Nombre d'épis par ha (x 104)	219,3 (12,2) a	213,7 (24,4) a	-	192,3 (37,5) a	240,1 (10,2) b	179,1 (39,9) a
Poids sec des épis (kg.ha ⁻¹)	2290 (12,6) a	2283 (33,4) a	-	2224 (17,1) a	4953 (58,3) b	2661 (41,5) a
Poids des 1 000 graines (g)	42,7 (2,9) a	41,1 (1,9) a	-	42,7 (2,9) a	53,9 (2,7) b	52,8 (4,5) b
Teneur en N des feuilles (%)	nd	nd	-	5,08 (0,31) a	5,55 (0,17) b	4,71 (0,41) a
Teneur en P des feuilles (g.kg ⁻¹)	nd	nd	-	6,01 (0,59) a	7,47 (0,38) b	7,56 (0,34) b
Colonisation mycorhizienne (%)	46,7 (5,8) a.	62,4 (6,4) b	-	54,7 (4,7) a	74,7 (4,8) b	69,9 (3,2) b
Longueur des hyphes (m g ⁻¹ sol sec)	1,66 (0,08) a	2,85 (0,07) c	2,14 (0,06) b	1,72 (0,07) a	2,98 (0,05) b	2,85 (0,04) b

Tableau 2 : Effets de la pratique culturale (W : monoculture de blé dur ; WF : culture mixte blé dur/fève ; W+F : rotation blé/rotation fèves) sur la biomasse totale produite (kg.ha⁻¹), nombre d'épis par ha, poids sec des épis (kg.ha⁻¹), poids de 1 000 graines (TSW), nutrition minérale et colonisation mycorhizienne du blé dur en 2012 et en 2013 réalisées dans la plaine du Haouz, à 30 km à l'est de Marrakech (Maroc).

(1) Erreur standard.

(2) Pour chaque année, les données d'une même ligne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes, d'après le test de Newman-Keul ($p < 0.05$).

(3) nd = non déterminé.

Bibliographie

AL-KARAKI (G.), McMICHAEL (B.) & ZAK (J.), "Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress", *Mycorrhiza* 14, 2004, pp. 263-269.

BABANA (A. H.) & ANTOUN (H.), "Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali", *Plant and Soil* 287, 2006, pp. 51-58.

FREEBAIRN (D. K.), "Did the green revolution concentrate incomes?", étude quantitative de rapports de recherche, *World Development* 23, 1995, pp. 265-279.

IJDO (M.), CRANENBROUCK (S.) & DECLERCK (S.), "Methods for large-scale production of AM fungi: past, present, and future", *Mycorrhiza* 21, 2011, pp. 1-16.

KHAN (M. S.) & ZAIDI (A.), "Synergistic effects of the inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria and an arbuscular mycorrhizal fungus on the performance of wheat", *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 31, 2007, pp. 355-362.

MADER (P.), KAISER (F.), ADHOLEYA (A.), SINGH (R.), UP-PAL (H. S.), SHARMA (A. K.), SRIVASTAVA (R.), VIKRAM SAHAI (V.), ARAGNO (M.), WIEMKEN (A.), JOHRI (B. N.) & FRIED (P. M.), "Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India", *Soil Biology and Biochemistry* 43, 2011, pp. 609-619.

MAHANTA (D.), RAI (R. K.), MISHRA (S. D.), RAJA (A.), PURAKAYASTHA (T. J.) & VARGHESE (E.), "Influence of phosphorus and biofertilizers on soybean and wheat root growth and properties", *Field Crops Research* 166, 2014, pp. 1-9.

SINGH (R.), BEHL (R. K.), SINGH (K. P.), JAIN (P.) & NARULA (N.), "Performance and gene effects of wheat yield under inoculation of arbuscular mycorrhiza fungi and Azotobacter chroococum", *Plant Soil Environment* 50, 2004, pp. 1214-1178.

SMITH (S. E.) & READ (D. J.), *Mycorrhizal symbiosis*, Third ed. Academic Press, Amsterdam, The Netherlands, 2008.

SURI (V. K.), CHOUDHARY ANIL (K.), CHANDER (G.) & VERMA (T. S.), "Influence of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Applied Phosphorus on Root Colonization in Wheat and Plant Nutrient Dynamics in a Phosphorus-Deficient Acid Alfisol of Western Himalayas", *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42 (10), 2011, pp. 1177-1186.

The Future of Farming (2011), Final Project Report, The Government Office for Science : London, UK, p. 211.

WAHBI (S.), SANGUIN (H.), TOURNIER (E.), BAUDOIN (E.), MAGHRAOUI (T.), HAFIDI (M.), PRIN (Y.), GALIANA (A.) & DUPONNOIS (R.), "Increasing the role of the mycorrhizal symbiosis in the plant-facilitation process to improve the productivity and sustainability of Mediterranean agrosystems", In *Plant Microbe Symbiosis - Applied Facets*, Springer Edition, 2014, pp. 327-336.

WAHBI (S.), PRIN (Y.), THIOULOUSE (J.), SANGUIN (H.), BAUDOIN (E.), MAGHRAOUI (T.), OUFDOU (K.), LE ROUX (C.), GALIANA (A.), HAFIDI (M.) & DUPONNOIS (R.), "Impact of wheat/faba bean mixed cropping or rotation systems on soil microbial functionalities", *Frontiers in Plant Science* 7 (1364), 2016, 9 p.