

Interactions sol-plante

Fiche **QUESTIONS SUR...** n° 01.08.Q06

juin 2024

Mots clés : activité biologique, racine, microorganisme, microbiote, endomycorhizes, allélopathie

Pour bien comprendre les interactions sol-plante, il faut connaître les relations entre les racines et le sol, ainsi que leurs conséquences sur le rendement. Un bon enracinement est la base d'une bonne exploration du sol ; en l'absence d'obstacle mécanique ou chimique, les racines des cultures annuelles explorent jusqu'à 1,50 m de profondeur et celles des cultures pérennes vont jusqu'à plusieurs mètres (vigne, olivier).

Par ailleurs, l'activité biologique du sol et les racines s'influencent mutuellement fortement, ce qui explique l'importance des successions de cultures sur la fertilité. Les effets positifs des rotations longues et diversifiées sont liés à la rupture des cycles de développement des bioagresseurs, et dans certains cas aux effets biochimiques (allélopathie).

Construction du système racinaire d'une plante

La construction du système racinaire s'effectue tôt, et son développement est bien plus important que la partie aérienne, en particulier pendant la phase d'installation : l'état de nutrition pendant les stades jeunes détermine la possibilité de s'alimenter correctement au long de sa croissance. En cas de mauvais état ou fonctionnement du système racinaire, l'absorption des éléments minéraux se fait mal ; ainsi, en présence de piétin-échaudage (une maladie des racines due à un champignon) sur le blé, la plante a besoin d'un sol plus riche en phosphore.

La croissance du système racinaire se poursuit durant toute la vie de la plante. À l'extrémité de chaque racine, un méristème apical protégé d'une coiffe assure la multiplication cellulaire, aussi la zone d'élongation permet à la racine de pénétrer dans le sol. Une zone de poils absorbants se forme à partir des cellules épidermiques quelques centimètres au-dessus de la zone d'élongation. Ces extensions tubulaires augmentent la surface de contact avec le sol ; plus cette surface est importante, plus les échanges sont facilités. À titre d'exemple, un hectare de blé développe à un mètre de profondeur plus de 100 000 kilomètres de racines et radicelles. Les racines servent aussi souvent d'organes de réserves ; cette fonction est évidente chez les plantes à racine tubérisée (betteraves, carottes, etc.) mais aussi pour d'autres, dont les herbacées vivaces (asperges, endives, pissenlits, etc.) et les plantes pérennes à feuillage caduc. Avant la chute des feuilles ou la dégénérescence des parties aériennes, la sève descend dans les racines, afin d'y stocker une réserve de nutriments pour un redémarrage rapide au printemps suivant.

Les plantes ont des systèmes racinaires très différents suivant les espèces, en particulier pour les plantes annuelles (ou bisannuelles) ; ceci explique en partie que les exigences en éléments minéraux sont différentes entre espèces. Le système racinaire a aussi un effet sur la structure du sol : les graminées herbacées (blé, orge, ray-grass, etc.) sont plus efficaces pour les restructurer que le maïs, la betterave ou la pomme de terre.

Les trois grands types de systèmes racinaires

Le système racinaire pivotant (se rencontre notamment chez les dicotylédones)

Ce système est caractérisé par une racine principale qui s'enfonce verticalement dans le sol, et sur laquelle se développent des racines secondaires latérales ; il permet un ancrage (cas de la tomate ou du persil). La racine pivotante peut être tubérisée et devenir un organe de réserve, comme chez les radis, les carottes, le persil, les betteraves, etc.

Le système racinaire fasciculé (se rencontre chez de nombreuses monocotylédones)

Les racines forment un faisceau où toutes démarrent du même point, sans prédominance de racine principale. C'est le cas chez les graminées (céréales à paille, maïs et graminées herbagères) et aussi chez les plantes bulbeuses ou rhizomateuses où les racines apparaissent à partir d'un plateau (oignons, fenouil, etc.).

Les racines adventives (se rencontrent sur la tomate et le maïs)

Elles se forment sur les tiges, à partir d'un nœud, et sont souvent complémentaires d'un autre type de système. Chez certaines liliacées, elles apparaissent dans la partie enterrée, au-dessus du bulbe d'où partent des racines fasciculées. Les racines adventives forment souvent un système traçant, développé à l'horizontale et courant juste sous la surface du sol. Dans certaines espèces, elles émergent parfois pour laisser apparaître une nouvelle plante (cas des plantes se multipliant par bouturage de tige capables de s'enraciner, comme la menthe).

Interactions systèmes racinaires-microorganismes

La rhizosphère comprend les racines, le sol les entourant ainsi que les microorganismes qu'elles influencent ; dans cet espace, les plantes libèrent des composés organiques (les exsudats racinaires) constitués de cellules et de tissus racinaires desquamés, de mucilages, de composés volatils, de lysats solubles (sucres, acides aminés et acides organiques). Ces composés organiques représentent 5 à 21 % du carbone fixé lors de la photosynthèse. Leur libération massive dans le sol favorise le développement de communautés microbiennes. Le pH de la rhizosphère est toujours plus acide que le sol environnant. Le microbiote associé aux racines joue un rôle central dans le développement des plantes, selon des associations spécifiques à chaque espèce ; l'ensemble racines + microbiote est considéré comme un super organisme appelé holobionte.

Les bactéries

Au cours du développement de la plante, les populations bactériennes colonisent la zone racinaire et peuvent faciliter la croissance par divers mécanismes ; ainsi, l'activité enzymatique des bactéries stimule le développement et l'activité racinaires. La fixation symbiotique de l'azote de l'air par les bactéries des nodosités des légumineuses est bien connue. Mais les microorganismes constitutifs de la rhizosphère sont aussi impliqués dans divers mécanismes comme la solubilisation d'éléments nutritifs facilitant leur absorption (nombreux éléments, comme le fer ou le magnésium). L'élément le plus étudié est le phosphore, en raison de la faible solubilité des ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} (seules formes utilisables par les cultures), et donc de sa faible biodisponibilité. Les bactéries jouent aussi un rôle important pour la minéralisation du phosphore organique (non biodisponible), réalisée par des phosphatases produites par les bactéries de la rhizosphère.

Les champignons

La majorité des plantes cultivées ont un effet positif pour le développement des mycorhizes, qui à leur tour peuvent être indispensables au développement des plantes ; les légumineuses leur sont particulièrement favorables. Cependant, certaines cultures mycorhizent peu, voire pas du tout ; ainsi, le blé mycorhize peu. D'une manière générale, les variétés anciennes mycorhizent mieux que les variétés modernes.

Certaines plantes ne mycorhizent jamais et même sont défavorables aux champignons du sol. Les crucifères (brassicacées : colza, choux, moutarde...) et les chénopodiacées (épinard, betterave) sont connues pour être défavorables aux champignons mycorhiziens : les glucosinolates présents dans leurs tissus sont transformés par certains microorganismes en thiocyanates toxiques pour les champignons et les mycorhizes. Ceci a des conséquences importantes : en grandes cultures, un blé après colza aura moins de mycorhizes qu'un blé après pois, et sa capacité à utiliser le phosphore, l'azote et l'eau du sol sera diminuée. Ceci expliquerait l'écart systématique de rendements entre blé après pois et blé après colza. Cependant, les thiocyanates sont aussi toxiques pour des champignons parasites du blé (piétin-échaudage et piétin-verse), ce qui explique que les blés après colza sont moins atteints par ces maladies que les blés derrière un autre blé.

Système racinaire et accessibilité du phosphore

Le phosphore, indispensable à la croissance, est peu mobile dans le sol, aussi l'architecture racinaire joue un rôle important dans son absorption. Ainsi, les graminées, les céréales à paille, ou la luzerne – avec leurs systèmes fasciculés explorant un large volume – sont plus efficaces pour acquérir le phosphore que des espèces à racines pivotantes.

Le blé sur sol non labouré s'alimente correctement en phosphore, bien que l'engrais phosphaté, apporté pour compenser les exportations, reste localisé en surface, car en technique simplifiée son système racinaire est plus abondant en surface. Il semble aussi que l'absorption du phosphore est très importante pendant la phase d'installation, lorsque les racines sont dans la zone à concentration élevée en éléments nutritifs. Aussi les techniques simplifiées devraient permettre de réduire les doses d'engrais phosphaté. Beaucoup d'études, par exemple sur le haricot et le soja, ont montré que les génotypes à système racinaire ramifié en surface étaient plus performants que ceux à système peu ramifié et profond. Le caractère *angle racinaire* apparaît donc

comme un trait important pour économiser des engrais phosphatés au moins dans les agroécosystèmes qui ne sont pas trop contraints par la sécheresse au moment de l'installation.

Intérêt des rotations pour une meilleure utilisation du sol

Il est établi que les rendements dépendent des précédents culturaux et de la rotation. Les "effets précédents", positifs ou négatifs, sont multiples et difficiles à décomposer. Ainsi, la rotation et les engrais verts maintiennent le taux de matière organique, améliorent la structure du sol, et favorisent la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses.

Mais on observe aussi des effets négatifs, en partie expliqués par des bioagresseurs favorisés par des rotations courtes, beaucoup de ceux-ci s'attaquant aux racines et pénalisant l'alimentation en eau et en éléments minéraux. Ce sont des champignons (piétin-verse, piétin échaudage, Fusarium, Aphanomyces, Rhizoctone, etc.), des insectes (larves de taupins, de tipules, de sitones, etc.) ou des vers (nématodes) Il est donc important de surveiller la qualité sanitaire du système racinaire.

Les espèces cultivées et les engrais verts ont des systèmes racinaires différents, ils explorent de ce fait le sol de manière plus ou moins efficace. Faire alterner les cultures permet de mobiliser plus efficacement les éléments minéraux et donc de réduire les besoins en engrais.

Effet global d'une succession sur le rendement des cultures

Le tableau ci-dessous présente les rendements relatifs du blé en fonction de la culture précédente, sur trois départements, d'après des enquêtes *pratiques agricoles* de l'ONIC¹. On constate que les blés après pois ont de meilleurs rendements que les blés après colza, et que ceux-ci sont meilleurs que les blés après blé. L'explication par un effet azote – lié au reliquat d'azote plus élevé derrière un pois que derrière un colza ou un blé – est probablement insuffisante, car les agriculteurs différencient bien les doses d'azote en fonction des précédents culturaux. La hiérarchie serait liée à l'effet des thiocyanates qui détruisent les champignons pathogènes.

	Culture précédente					
	Blé tendre	Colza	Maïs	Pois	Betterave	Tournesol
Eure-et-Loire	95	100	100	102		
Seine-et-Marne	92	99	97	105	101	
Yonne	93	100	101	115		101

Figure 1 : Rendement moyen du blé tendre en fonction du précédent cultural dans trois départements, en % du rendement moyen départemental (d'après enquête ONIC "pratiques culturales" 1995 à 2004 - traitement Arvalis)

Intérêt des plantes de services : engrais verts et associations d'espèces

Cas des cultures annuelles

Les plantes de service concernées ici appartiennent à la famille des légumineuses. Par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, elles accroissent la disponibilité en azote. Les effets de leur introduction seront d'autant plus importants que le sol est carencé en azote, ce qui est généralement le cas en agriculture biologique (AB). Dans la majorité des associations cultivées en agriculture biologique, le rendement céréales/protéagineux est augmenté par rapport à la moyenne des deux espèces cultivées en pur (cf. Figure 1). Les rendements d'un mélange sont plus stables d'une année à l'autre qu'avec des espèces seules, cependant cette stabilité s'accompagne, dans la récolte,

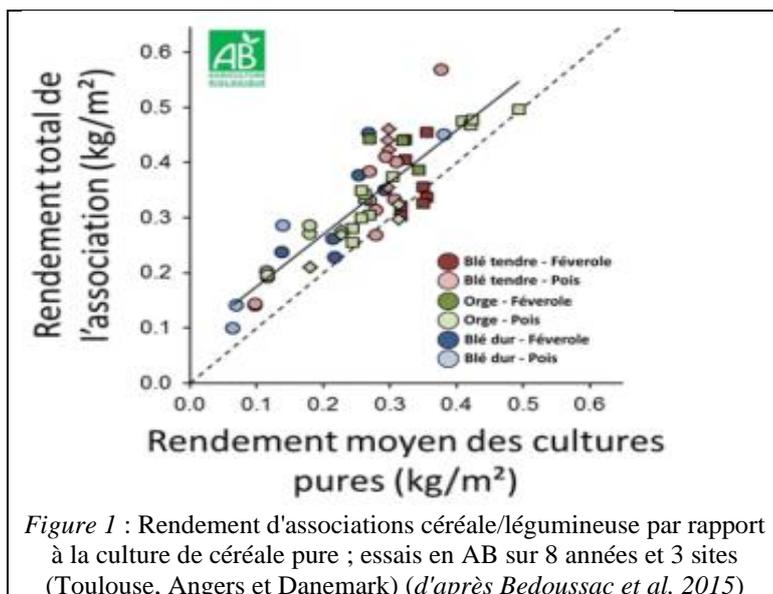


Figure 1 : Rendement d'associations céréale/légumineuse par rapport à la culture de céréale pure ; essais en AB sur 8 années et 3 sites (Toulouse, Angers et Danemark) (d'après Bedoussac et al. 2015)

¹ ONIC est maintenant regroupé avec les autres filières agricoles au sein de FranceAgriMer.

d'une proportion variable de chaque espèce. Par ailleurs, on constate que la culture suivante de la rotation bénéficie de l'azote fixé par la légumineuse, généralement en quantité moins élevée qu'après une culture pure de légumineuses.

Les expérimentations sur des associations colza/légumineuses, où seul le colza est récolté, montrent qu'en fin de la floraison les colzas ont absorbé entre 20 et 40 kg d'azote/ha de plus que le témoin colza cultivé seul (colza et légumineuse doivent être semés précocement à l'automne, car les légumineuses ont besoin de chaleur pour se développer). Les plantes de services doivent être détruites pendant l'hiver pour que l'azote – contenu dans la légumineuse et les nodosités – ait le temps de se minéraliser et de profiter à la nutrition du colza ; on recherche donc des légumineuses sensibles au gel, ou qui se dégradent durant l'hiver, par sénescence ou sensibilité à la photopériode. L'association colza/mélange de féveroles, vesces pourpres, trèfles d'Alexandrie est une modalité intéressante.

Associer des arbres fruitiers et des légumineuses : exemple de coopération grâce aux mycorhizes

Il est intéressant d'associer des arbres fruitiers et des légumineuses herbacées (en inter-rang), ce qui facilite leurs échanges grâce à la facilité de ces dernières à mycorhizer. Les noyeraies conduites en conventionnel ou en bio – mais avec un couvert végétal inter-rang à base de féverole (150 kg/ha de semence) de fin octobre à fin avril – présentent une intensité de mycorhization deux fois plus élevée que dans le cas sans couvert de légumineuses. L'analyse moléculaire des espèces présentes montre que le nombre d'espèces de mycorhizes, présentes sur les racines des noyers, est deux fois plus élevé lorsqu'il y a un couvert de féverole que lorsqu'il n'y en a pas. De même, les racines de féveroles présentent deux fois plus d'espèces d'endomycorhizes que les racines de graminées ou de la flore spontanée.

L'allélopathie

L'allélopathie est le phénomène encore mal connu, par lequel une plante produit une ou plusieurs substances chimiques toxiques qui pénalisent la germination, la croissance, la survie d'une autre plante. Ces produits toxiques sont généralement des exsudats racinaires ou des éléments de décomposition des résidus (paille d'orge, par exemple). Ils sont très biodégradables, et l'effet est souvent fugace, dépendant des conditions climatiques ; le maximum d'effet survient près des racines. Certains engrais verts ont des effets allélopathiques au moment de leur développement, qui empêchent, par des exsudats racinaires, la germination ou le développement d'une adventice. Dans d'autres situations, après destruction, la décomposition des résidus libère des substances allélopathiques ; ainsi, le développement et la germination des matricaires (adventices très fréquentes en grandes cultures AB) sont limités dans une parcelle de seigle. L'avoine, le tournesol et la vesce ont également des propriétés allélopathiques limitant le développement des adventices. La moutarde et le radis ralentissent la germination de certaines graminées (ray-grass).

Philippe VIAUX, membre de l'Académie d'Agriculture de France

Ce qu'il faut retenir :

Chaque espèce a un système racinaire propre, par sa morphologie et par ses exsudats racinaires ; cette variabilité est utile pour maintenir ou améliorer la fertilité.

Faire alterner différentes cultures dans la rotation permet une meilleure utilisation des éléments minéraux du sol, grâce à sa meilleure exploitation par les racines.

Des bioagresseurs peuvent s'attaquer aux racines et pénaliser l'alimentation en eau et en éléments minéraux des cultures, il faut donc surveiller la qualité sanitaire du système racinaire.

Cultiver des associations d'espèces permet des échanges profitables entre cultures.

Les mycorhizes jouent un rôle important pour l'alimentation en eau et en minéraux de certaines cultures.

Pour en savoir plus :

- P. GATE & P. CASTILLON : *Le système racinaire des céréales à paille Une organisation souterraine structurée*, Perspectives agricoles n° 363 , 2010.
- P. HINSINGER, G. R. GOBRAN, P. J. GREGORY, W. W. WENZEL : *Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes*, New Phytologist, 168 (2), 2005
- Philippe VIAUX : *Dix clés pour une fertilité durable des sols agricoles*, Édition France Agricole, 2023.