

LA RÉVOLUTION VERTE DU XXI^E SIÈCLE REPOSERA SUR LES INTERACTIONS PLANTES-MICROORGANISMES

Par Thomas Rey

L'apport de fertilisants minéraux et de pesticides dans l'agriculture du XX^e siècle a permis de nourrir une population grandissante. Cependant, l'utilisation intensive de ces produits se révèle néfaste pour l'environnement, la santé humaine et le coût de la production alimentaire. Ce constat a acté le retrait des trois quarts des pesticides et a impulsé la recherche de méthodes alternatives. Une piste prometteuse est l'utilisation des microorganismes du sol.

Dans chaque gramme de sol, on trouve des centaines de mètres d'hyphes de champignons ou d'oomycètes et des millions de bactéries. Ces organismes améliorent ou affectent la disponibilité en nutriments dans le sol et sont à l'origine d'interactions avec les plantes dans les quelques millimètres entourant les racines (rhizosphère).

Les endosymbioses mutualistes se déroulent à l'intérieur des cellules racinaires des plantes et sont bénéfiques à la fois pour l'hôte végétal et le partenaire microbien. Dans la symbiose mycorhizienne, le partenaire fongique fournit des nutriments issus du sol en échange de sucres échangés par la plante au sein de structures appelées arbuscules (Figure 1)¹. Les champignons et oomycètes parasites interagissent également avec les racines. Ils projettent leur mycélium dans les cellules hôtes (haustoria Figure 2) et prélèvent les nutriments jusqu'à provoquer la mort de l'hôte. Ces maladies sont difficiles à traiter et un sol infesté par un agent pathogène peut rester contaminé plusieurs années.

— DES PROCESSUS COMMUNS DANS LE CONTRÔLE DES INTERACTIONS BÉNÉFIQUES ET PATHOGÈNES ? —

Les plantes doivent donc distinguer les partenaires mutualistes, des parasites afin de promouvoir la colonisation des racines par les microbes bénéfiques tout en mettant en œuvre des réponses immunitaires à l'encontre des agresseurs.

Un dialogue basé sur l'échange de signaux chimiques est donc nécessaire dans la mise en place des interactions. Or, de fortes similitudes existent entre les signaux des deux types d'interaction. De même, les similarités entre les structures développées par les champignons et oomycètes parasites (haustoria) et les champignons mycorhiziens (arbuscules) à l'intérieur des racines laissent supposer que des processus communs à la formation des interfaces plantes-microbes existent.

La Révolution verte du siècle passé s'est focalisée sur l'optimisation du développement des plantes de grande culture pour permettre la mécanisation de leur exploitation. Ce faisant, nous découvrons peu à peu que nos variétés élites ont une capacité limitée à s'adapter à leur environnement microbiologique.

— FAVORISER LES ASSOCIATIONS BÉNÉFIQUES SANS ACCROÎTRE LA SENSIBILITÉ AUX PARASITES —

L'objectif est donc de comprendre comment les plantes discriminent les microorganismes du sol afin d'engager des associations bénéfiques tout en repoussant les invasions par les microorganismes pathogènes. Pour ce faire, une plante modèle, *Medicago truncatula*, est utilisée (Figure 3). Cette plante est aussi l'hôte d'*Aphanomyces euteiches*, un oomycète du sol qui cause notamment la pourriture racinaire du pois et la fonte des semis. L'inexistence de traitement chimique contre cette maladie et la subsistance des spores de cet oomycète dans le sol durant une décennie, ont conduit à une forte diminution des rendements et de la culture du pois en France. Elle est passée de plus de 600 mille hectares dans les années 1990 à moins de 200 mille en 2009. Ce désengagement est extrêmement regrettable puisque cette plante, est une source de protéines végétales

1- Pour en savoir plus : dossier n°622 de jardin de France « Mycorhizes, auxiliaires discrètes du jardiniers et au colloque scientifique de la SNHF « Alliances au pays des racines »

et fertilise le sol en interagissant avec les microbes bénéfiques. Grâce à la proximité génétique entre *M. truncatula* et le pois, il est envisageable de transférer rapidement les connaissances gagnées chez cette première au bénéfice de la seconde.

Des travaux exploratoires testant des variants génétiques de *M. truncatula* incapables de former la symbiose, ont montré que plusieurs gènes requis pour la formation des interactions mutualistes jouent des rôles positifs pour certains et négatifs pour d'autres dans la formation de l'association avec *A. euteiches*, mais aussi avec d'autres parasites fongiques ou bactériens. Ainsi, le récepteur NFP², positionné à la surface des cellules racinaires, est requis pour activer le programme génétique menant aux interactions mutualistes, il participe aussi à la résistance envers *A. euteiches*. De plus, l'étude transcriptomique³ d'un mutant d'un facteur de transcription⁴ requis pour la symbiose fixatrice d'azote nous a permis de démontrer que ce gène est un important répresseur de l'immunité végétale. Ces travaux ouvrent des perspectives nouvelles pour améliorer la résistance des plantes aux maladies sans compromettre les associations bénéfiques.

— PUISER DANS LA VARIABILITÉ NATURELLE DES ASSOCIATIONS PLANTES MICROORGANISMES POUR CHANGER NOTRE AGRICULTURE —

Une alternative à cette approche ciblée sur des variants incapables de former les symbioses mutualistes, est d'utiliser la variabilité naturelle des plantes. Une plante comme *M. truncatula* est distribuée en populations isolées tout autour du bassin méditerranéen. Sa répartition actuelle est le fruit de l'isolement progressif de groupes restreints après que cette espèce se soit éloignée du point d'où elle a émergé. Ces petits groupes ont sensiblement divergé d'un point de vue génétique suite à une pression de sélection issue de la variation de l'environnement dont la flore microbienne. Les méthodes d'analyse génomiques ont permis

2- Récepteurs : protéines enchâssées ou ancrées à la membrane périphériques des cellules, chargées de reconnaître des signaux externes et de les transmettre à l'intérieur de la cellule.

3- Étude transcriptomique : Technologie permettant de mesurer simultanément l'expression de tous les gènes d'un être vivant.

4- Facteur de transcription : Protéines se liant à l'ADN afin de permettre l'expression des gènes.

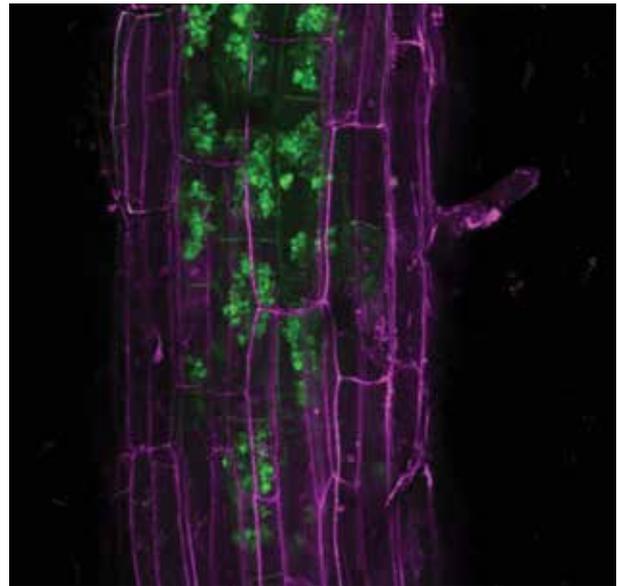


FIGURE 1 : MARQUAGE DES ARBUSCULES DÉVELOPPÉS PAR UN CHAMPIGNON MYCORHIZIEN PAR UNE PROTÉINE VÉGÉTALE FLUORESCENTE (VERTE) LOCALISÉE À L'INTERFACE SYMBIOTIQUE. LES PAROIS VÉGÉTALES (VIOLET) SONT OBSERVÉES GRÂCE À LEUR AUTOFLUORESCENCE - © DR. TEMUR YUNUSOV, SCHORNACK LAB, SAINSBURY LABORATORY, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



FIGURE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN *PHYTOPHTHORA PALMIVORA* FLUORESCENT (JAUNE) AU SEIN D'UNE RACINE DE *MEDICAGO TRUNCATULA*. LES COURTES RAMIFICATIONS PERPENDICULAIRES AUX HYPHES SONT APPELÉES HAUSTORIA (FLÈCHE ROUGE) - © DR. THOMAS REY, SCHORNACK LAB, SAINSBURY LABORATORY, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



FIGURE 3 : *MEDICAGO TRUNCATULA*, PLANTE MODÈLE DES INTERACTIONS RACINAIRES AVEC LES MICROORGANISMES MUTUALISTES ET PARASITES - © DR. THOMAS REY, SCHORNACK LAB, SAINSBURY LABORATORY, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



FIGURE 4 : ECHANTILLONNAGE DE LIGNÉES NATURELLES DE *MEDICAGO TRUNCATULA* (GAUCHE) ET REPRÉSENTATION DE LA VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE AU SEIN DE LA POPULATION POUR UN GÈNE CODANT UN TRANSPORTEUR DE PEPTIDE. CHAQUE CAMEMBERT REPRÉSENTE LA RÉPARTITION D'UNE VARIATION GÉNÉTIQUE AU SEIN DE LA POPULATION NATURELLE DE *M. TRUNCATULA*. (CAPTURE D'ÉCRAN, ISSUE DU PROJET *MEDICAGO* HAPMAP)

de cartographier ces variations génétiques chez plusieurs centaines de lignées naturelles (Figure 4). Ainsi, en corrélant la diversité de réponse des plantes à un stimulus environnemental, aux subtiles variations du contenu de l'information génétique des lignées, il est possible d'identifier les gènes contrôlant la variabilité des réponses et d'analyser leur contribution aux réponses végétales.

Chez *M. truncatula*, les premières études concernent l'aptitude à former la symbiose fixatrice d'azote et la résistance à *A. euteiches*. Mais des études de la réponse de *M. truncatula* à *Phytophthora palmivora* sont aussi menées. Cet autre oomycète est capable d'infecter plus de 200 espèces végétales, des plantes angiospermes monocotylédones de grande culture aux arbres fruitiers tels que les manguiers. Sa dissémination est renforcée en raison du réchauffement climatique. Bien qu'aucune infection en milieu naturel n'ait été observée, il a été démontré que *P. palmivora* peut

coloniser *M. truncatula* en laboratoire, constituant ainsi une interaction originale à la fois pour la plante et le microbe (Figure 2 et 3) ce qui permettra de comprendre quelles sont les fonctions de base requises chez la plante et le microbe pour former une telle association.

— OBTENIR UNE RÉSISTANCE DURABLE —

Toutes ensemble, ces différentes trajectoires de recherche devraient permettre de séparer ce qui relève du mutualisme et de la pathogénicité. Ainsi, il deviendrait possible, d'obtenir une résistance durable et fonctionnelle chez les plantes de grande culture vis à vis de différents agents pathogènes. Cette stratégie pourrait se substituer aux approches de sélection actuelles visant à intégrer des gènes de résistance spécifiques d'agents pathogènes. Cette dernière approche est en effet compromise par la faculté des parasites à évoluer et à contourner rapidement les réponses immunitaires de leurs plantes hôte.