

Biostimuler l'interface sol-plante pour l'amélioration des productions végétales

Marie-Emmanuelle Saint-Macary est docteure en physiologie végétale et travaille maintenant chez Frayssinet. Olivier Demarle, est directeur de la recherche et du développement de cette même société. Ils sont spécialistes de la physico-chimie des sols et des échanges entre espèces radicalaires qui ambitionnent de tout comprendre dans son rôle en agriculture.

Introduction

Parmi les différents leviers à l'aide desquels on peut favoriser l'agriculture, ni la partie biostimulation des plantes, ni la biostimulation du sol ne sont en général mentionnées par le de digital ; on parle de biocontrôle, mais on ne parle pas de biostimulation. C'est précisément de biostimulation dont ce chapitre se saisit. Mais il ne faut pas oublier une remarque très importante : un des grands principes de l'agronomie est de dire que les différentes approches ne

doivent pas s'opposer les unes aux autres.

Ce chapitre prend place dans un volume qui traite de l'utilisation de la chimie. La chimie est souvent assimilée à la synthèse de molécules, mais pour nous ici, ce ne va pas être son rôle principal. Pour nous, dans notre quotidien, elle constitue principalement un moyen de compréhension du vivant. La réaction à l'échelle moléculaire est la base ; ensuite viendront la chimie de l'individu, de la plante et des interactions entre organismes.

L'ENTREPRISE FRAYSSINET

Frayssinet est une entreprise familiale située dans le Tarn, spécialisée dans la fertilisation organique et les biostimulants. L'entreprise a été créée en 1870, et sa culture a toujours été basée sur le principe de ce qu'on appelle aujourd'hui l'économie circulaire et la valorisation à but agronomique, de co-produits de l'industrie agro-alimentaire ou de l'agriculture.

Dans le présent chapitre, vous verrez que l'approche chez Frayssinet, est centrée sur la compréhension et l'accompagnement des mécanismes naturels, donc de la plante, de la physiologie et des fonctionnements du sol pour arriver à trouver des solutions vraiment efficaces. C'est cette approche-là qui fait qu'aujourd'hui l'entreprise est leader français de l'étude de la nutrition et de la stimulation du sol et des plantes – ce qu'on appelle la biostimulation.

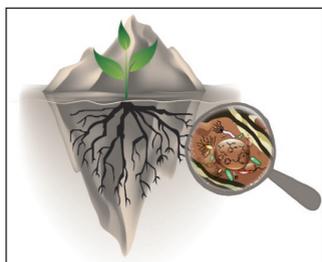


Figure 1

La partie visible de la plante n'est que la face émergée de l'iceberg.

La **Figure 1** représente un fameux iceberg : on voit la plante (la partie émergée) mais il y a énormément de choses qui se passent en dessous, dans le sol, au niveau des racines. On va essayer de pénétrer ce monde où se fait le plus gros des volumes des échanges.

1 La biostimulation

1.1 Contexte

Enjeux de la biostimulation

Le graphique de la **Figure 2**, tiré d'une conférence du professeur Du Jardin, résume les enjeux de l'amélioration des rendements agricoles. Il s'agit vraiment du but premier de l'agriculture car cela conditionne le revenu de l'agriculteur et, avant tout, parce que cela répond à la demande d'alimentation qui bien sûr concerne tout le monde.

Le rendement théorique de la culture d'une plante est son **potentiel génétique**. Mais le rendement réel dépend des conditions pratiques de la culture : quand on fait des

études en laboratoire, on dépasse les niveaux de rendement jamais atteints au niveau des champs. C'est que le rendement réel ne dépend pas seulement des qualités génétiques intrinsèques ; il dépend aussi du métabolisme de la nutrition parmi d'autres facteurs.

Les *adventices*, les pathogènes constituent d'autres facteurs ; en se protégeant contre eux, on va se rapprocher d'un rendement plus proche du potentiel génétique. L'une **des approches à l'étude pour protéger la plante est le « biocontrôle »**, mais le biocontrôle ne fait réellement « que » substituer une façon de protéger par une autre (par exemple, l'emploi de produits chimiques), donc il ne permet pas de franchir les frontières. De même, dans le travail de fertilisation organique, si on ne parle que de nutrition organique, on substitue de l'azote minéral par de l'azote organique : on n'améliore donc pas le système. **Le grand oublié dans toutes ces techniques, c'est la biostimulation : comment optimiser la physiologie de la plante pour aller chercher**

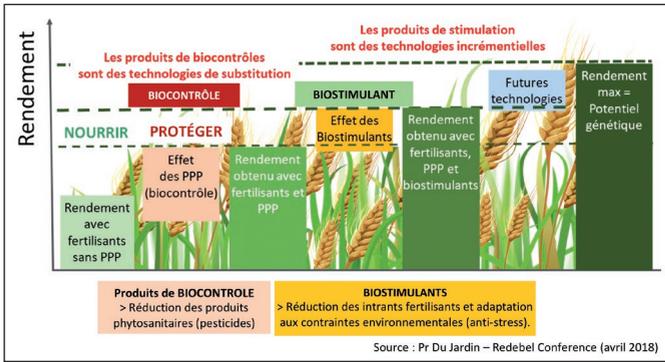


Figure 2

Effet des technologies de substitution et incrémentielles sur le rendement (PPP = produit de protection des plantes).

un petit peu plus de rendement ? Il ne s'agit pas de tout arrêter pour faire des biostimulants, mais il s'agit de faire usage de toutes les techniques utiles. Comme mentionné par le professeur Du Jardin, d'autres technologies apparaîtront et la sélection génétique au niveau des semences y jouera un rôle majeur.

Voilà où se place l'enjeu de la biostimulation et voilà pourquoi nous la présentons dans ce chapitre.

Biostimulation et stress

Pour parler de biostimulation, il faut avant tout parler de stress. Les plantes vivent dans un environnement et l'environnement peut être agressif. On définit deux typologies de stress : ce qu'on appelle **des stress abiotiques** – qui ne sont pas provoqués par un pathogène – ce peut être la sécheresse, la chaleur, le froid, des problématiques de pH, des inondations. D'un autre côté, il y a **les stress biotiques** – les insectes, les bactéries, les champignons, toutes ces maladies qui viennent s'attacher au vivant (**Figure 3**).

Le biostimulant se positionne sur la partie stress abiotique,

alors que **le biocontrôle se positionne sur la partie pathogène** ; il ne sera donc plus question de cette dernière dans la suite du chapitre.

Une remarque à ce niveau : la plante ne se déplace pas et la nourriture devra « arriver » à elle. Il va donc falloir que les moyens de protection sachent s'orienter vers la plante. La réponse de la plante à toutes les modifications ou les stress se fait par des mécanismes physiologiques. Plus précisément, elle met en place des mécanismes chimiques et biochimiques pour pouvoir survivre.

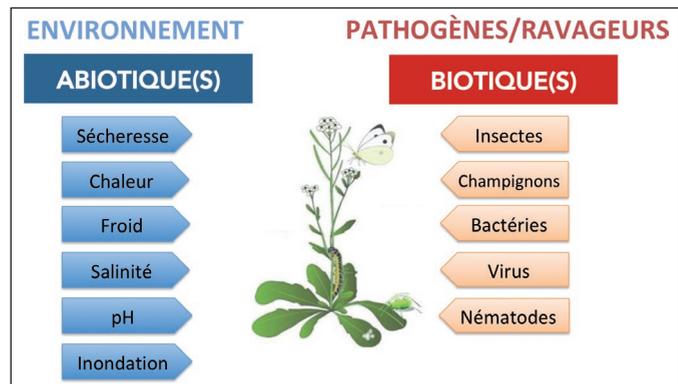


Figure 3

Les 2 types de stress du vivant et leurs causes.

1.2 Définir les biostimulants

D'après sa définition rigoureuse, un **biostimulant est un produit qui stimule les processus de nutrition des végétaux, à l'exclusion des éléments nutritifs** : si j'apporte de l'azote à une plante, elle va grandir, donc l'azote stimule la plante. Mais l'azote étant un élément nutritif, il ne peut pas être qualifié de biostimulant. Le biostimulant est explicitement associé à la physiologie végétale, aux mécanismes cellulaires.

Cela va permettre aussi d'améliorer quatre caractéristiques des végétaux, ou de la *rhizosphère* : soit des tolérances à des stress abiotiques que je viens de vous citer (température, chaleur, froid, salinité), soit des caractéristiques qualitatives (en mettant tel produit j'arrive à avoir un meilleur taux de sucre, une meilleure fermeté, j'arrive à mieux exprimer

le potentiel génétique), soit deux types d'efficacité : d'abord une meilleure **utilisation des éléments nutritifs** (la plante va mieux prendre l'élément nutritif, mieux le métaboliser et mieux utiliser son énergie) soit elle va favoriser une meilleure disponibilité des éléments nutritifs (construire et exploiter le potentiel du sol) (*Figure 4*).

Autour de cette définition, et à l'échelle européenne, nous avons aujourd'hui quatre types de produits qui peuvent rentrer dans ces catégories-là :

- ce qui est **extrait de plante ou d'algue**,
- ce qui est **micro-organismes vivants**,
- les **acides humiques ou fulviques** ou alors,
- **quelques sels inorganiques**, par exemple la silice.

Ce sont les matières utilisées qui définissent la qualification de biostimulant au niveau réglementaire.

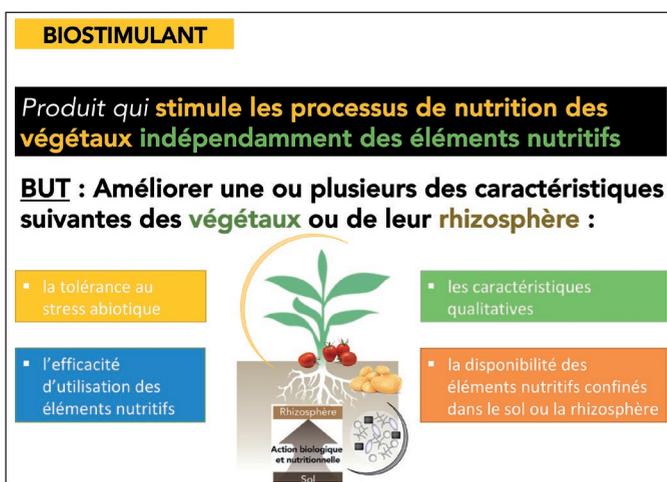


Figure 4

Définition d'un biostimulant et son action d'amélioration sur les quatre caractéristiques principales des plantes et de leur rhizosphère.

Il existe tout un dossier d'homologation à respecter qui comporte une évaluation de l'efficacité et de la toxicité, pour autoriser la mise sur le marché. Quoique plus léger que l'équivalent pour les phytosanitaires, le processus d'homologation nécessite beaucoup de rigueur.

1.3 Description du sol

Composition et origine des éléments nutritifs

La **Figure 5**, résume comment et de quoi se nourrit une plante et comment elle va pouvoir, à partir de quelques éléments, faire toute sa croissance et générer l'ensemble du rendement et de la production.

Le sol est un « milieu complexe », un assemblage d'une quantité de composants. Il associe des matières minérales, des argiles, des sables et des *limons*, et de la matière organique. Il joue le rôle majeur pour la vie de la plante, dont les racines lui apportent des éléments minéraux indispensables. La plante prend dans le sol des nitrates, des phosphates, du potassium et tous les autres *oligo-éléments*, mais elle les prend sous forme minérale.

Dans un système agricole, on extrait, *via* les produits, les éléments constitutifs du sol qui ont servi d'éléments nutritifs ; il faudra ensuite les reconstituer. Ces éléments nutritifs proviennent d'une nutrition minérale, ou encore d'une fertilisation organique ou des résidus de culture.

La matière organique du sol va constituer la source de nutrition pour les plantes et on peut

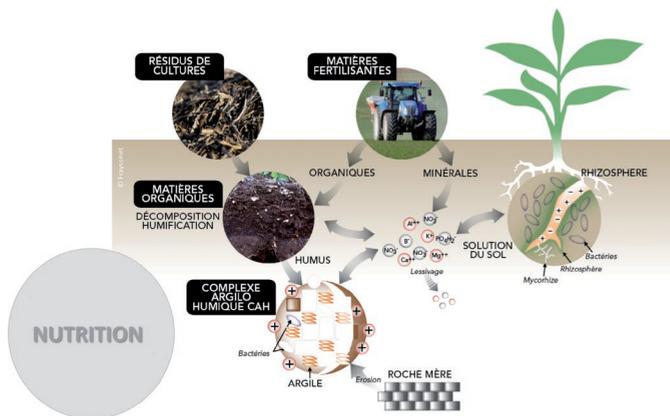


Figure 5

Composition et déroulement de la nutrition d'une plante.

ainsi s'adapter à la fourniture de minéralité, d'éléments minéraux. Tout ceci nous fait entrer dans les processus du vivant : les échanges dans les écosystèmes où les micro-organismes du sol minéralisent la matière organique pour donner les éléments nutritifs à la plante.

Améliorer la disponibilité des éléments nutritifs par biostimulation

Pour comprendre et mettre en œuvre la biostimulation, il faut examiner la disponibilité des éléments nutritifs qui sont confinés dans le sol ou dans la rhizosphère (**Encart**). Le but va

LA RHIZOSPHERE

La rhizosphère, c'est l'espace qu'il y a autour des racines : il y a la racine, le sol et entre les deux une interface. C'est dans cet espace que se passe tout le schéma nutritionnel, c'est là que la plante va se nourrir.

On a pu faire une analogie entre la nutrition humaine et la nutrition des plantes.

On regarde alors, la racine de façon très vulgarisée comme un tube digestif « externalisé et retourné ». On peut décrire la rhizosphère comme abritant les micro-organismes mais autour de la racine et non pas à l'intérieur d'un tube digestif.

être d'activer les flores du sol, de savoir comment dynamiser la vie rhizosphérique.

Pour améliorer la disponibilité des éléments nutritifs, on a deux voies : soit améliorer la flore tellurique¹ du sol, soit créer les conditions d'une mise à disposition des éléments nutritifs plus rapide (Figure 6).

Sur le schéma de la Figure 7, dans sa partie droite, on se

demande d'où vont venir les matières organiques qui vont dynamiser les micro-organismes, pour qu'ils produisent les enzymes extracellulaires. Ces enzymes permettront soit de mettre à disposition les éléments du sol, soit (voir plus loin dans ce chapitre) en association avec certains micro-organismes, d'impacter la croissance de la plante et de la stimuler.

1. Qui provient de la Terre.

Processus du sol participant à la nutrition de la plante

La construction d'un sol s'appelle la *pédogenèse*². Ce processus physico-chimique de désagrégation des roches-mères et de mélange avec de la matière organique prend des centaines d'années. Les matières organiques issues d'un système extérieur vont soit avoir un effet sur la physico-chimie du sol (structuration de la porosité), soit apporter une alimentation au niveau des processus biologiques. C'est ce qui distingue *minéralisation*³ primaire ou secondaire (Figure 8). Les apports de matière organique vont nourrir la plante via les micro-organismes, ou s'intégrer dans un cycle un peu plus long de formation du sol – parties *humus*⁴ et *complexe argilo-humique*⁵.



Figure 6

Les deux façons d'améliorer la disponibilité des éléments nutritifs par biostimulation.

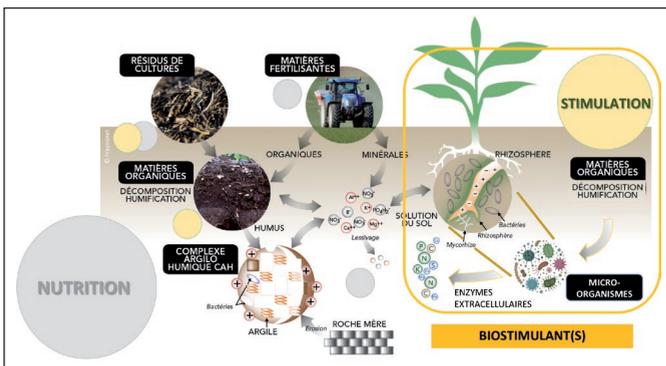


Figure 7

Utilisation de biostimulants pour améliorer la disponibilité des éléments nutritifs.

2. Ensemble des processus qui aboutissent à la formation, la transformation ou la différenciation des sols.

3. Décomposition de la partie organique d'une matière du sol qui contient également une partie minérale.

4. Partie supérieure du sol.

5. Complexe adsorbant qui a la propriété de retenir des cations présents dans le sol par des interactions électrostatiques.

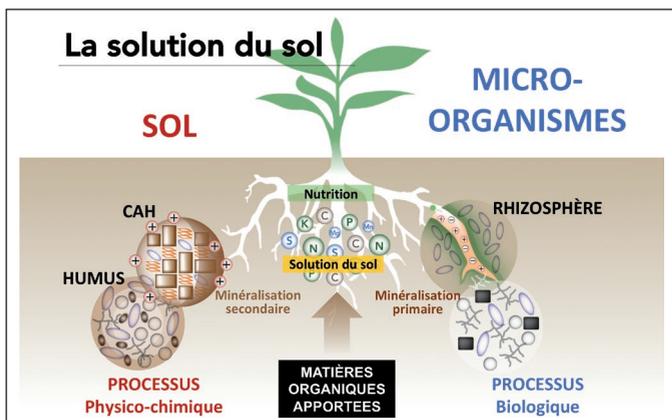


Figure 8

Les processus de nutrition du sol.

Les fonctions du sol

Les fonctions du sol sont d'abord des **fonctions de régulation** : il régule le cycle de l'eau, les cycles des nutriments, tout ce qui est pouvoir tampon, c'est aussi un puits de carbone – un aspect qui mérite un commentaire particulier. L'intérêt d'un puits de carbone n'est pas simplement de constituer un stockage de carbone, comme on l'entend dans les discussions sur le cycle du carbone et ses effets sur l'environnement. C'est aussi de sécuriser l'alimentation du sol car celui-ci assume des **fonctions de production** et constituer un **habitat pour les micro-organismes**.

La **Figure 9** résume les principales fonctions des sols.

La structure et la composition du sol

Il faut aussi comprendre la structuration des sols, résumée sur la **Figure 10**, pour pouvoir le stimuler et en tirer la quintessence. La structuration fait apparaître des agrégats de

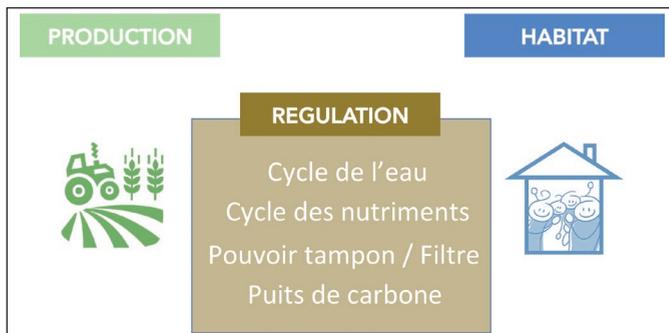


Figure 9

Les trois fonctions principales de sol.

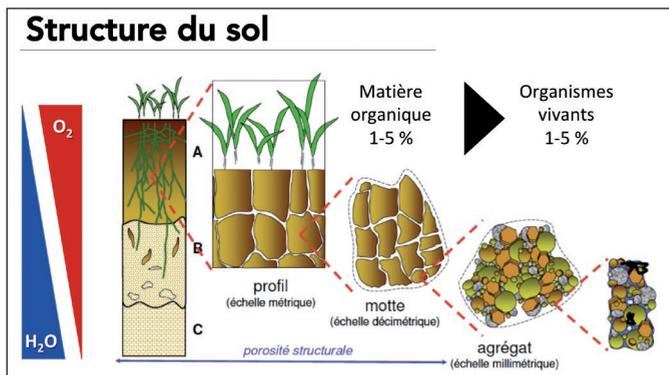


Figure 10

Structure du sol.

tailles variées dont une proportion de 1 et 5 % de matière organique, dont 1 à 5 % d'organismes vivants.

Plus on descend dans les échelles de dimension – vers les micro-agrégats – plus on identifie des micro-organismes de petites tailles. La totalité des organismes est importante ; pour donner un ordre de grandeur, rappelons que sur un hectare et à peu près 20 cm de profondeur, on va avoir entre 1 500 et 5 000 kg de bactéries, 3 500 à 5 000 kg de champignons (Figure 11). Ceci conduit tout de suite à la notion de diversité.

1.4 L'importance du sol

Les paramètres à considérer

L'étude de la vie et de la stimulation du sol, amène à considérer énormément de paramètres (Figure 12) et à ne pas se contenter de quantités moyennes, en se disant « je vais mettre du carbone et cela va stimuler » ou « je vais mettre des micro-organismes et tout va bien fonctionner ». Il faut maîtriser les conditions de température, de pH, de matière organique – est-ce que le sol est bien aéré ? pas aéré ? etc. Par exemple, on s'est rendu compte que selon les paramètres du sol, le cuivre pouvait être une bonne substance de biocontrôle, ou à l'inverse, une substance de blocage.

La figure résume la situation selon les compartiments du milieu. Les compartiments extérieurs sont assez bien connus. En revanche, les questions de pH ou de matière organique restent trop mal caractérisées.

Exemple d'implantation de population dans des sols différents

Les travaux de la recherche actuelle sont capables de mettre directement en évidence l'effet des modifications volontairement apportées aux sols, grâce à l'analyse des populations (en général bactéries ou champignons) et de leur adaptation à des conditions modifiées.

La Figure 13 schématise une expérience conduite par C. Alabouvette de l'INRAE – Dijon. D'un sol argilo-calcaire à pH égal à 8, il a prélevé la population organique (bactéries et champignons), puis il

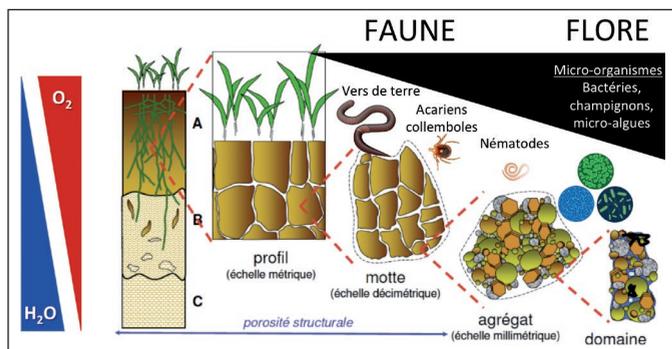


Figure 11

Composition de la flore du sol.

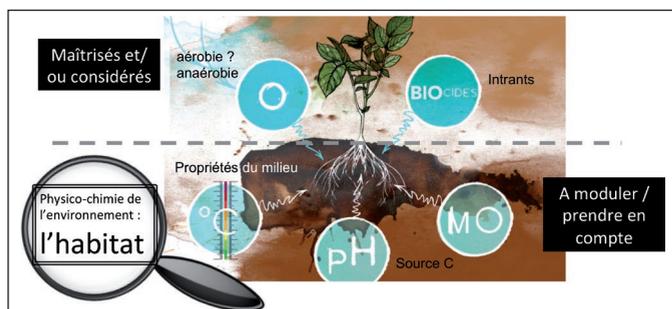


Figure 12

Paramètres à considérer affectant le sol.

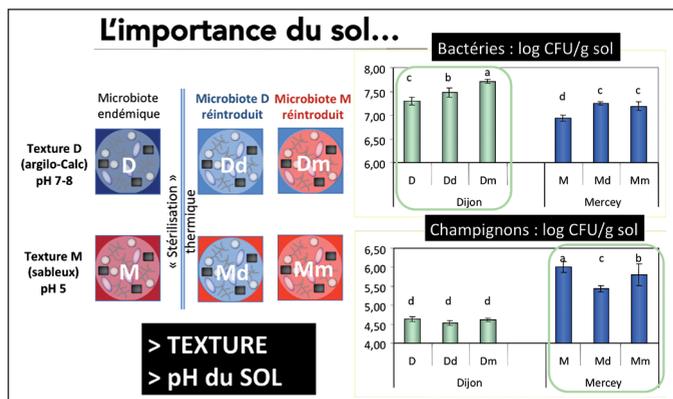


Figure 13

Résultat de l'expérience de Claude Alabouvette.

a stérilisé ce sol. Il a ensuite réinjecté la population organique d'une part dans le même sol d'autre part dans un sol sableux tout différent. Les mesures montrent que les populations se répartissent de façons toutes différentes selon le sol d'accueil. Ce qui veut vraiment dire que le contexte – le pH et la texture, etc. – est très important dans la gestion des micro-organismes du sol. D'autres travaux, notamment ceux des réseaux de mesures de la qualité des sols en France, redémontrent la même chose.

Exemple d'apport de matières différentes à un même sol

Nous avons conduit en interne (Figure 14) un autre essai dans le même esprit. On part d'un sol (pH plutôt basique à 7,9, un taux de matière organique de 2,4 % avec une flore caractérisée. On vient agir sur ce sol d'une part avec une matière classique et d'autre part avec un mélange *ad hoc* fait pour dynamiser. On vérifie bien

ensuite que les populations ne bougent pas du tout de la même façon, ce qui vérifie qu'on est bien capable d'alimenter et de stimuler la vie des sols par des matières organiques ciblées.

En fonction de ce que nous allons vouloir pour l'agriculture demain, nous allons pouvoir aller chercher la matière organique adaptée – soit par

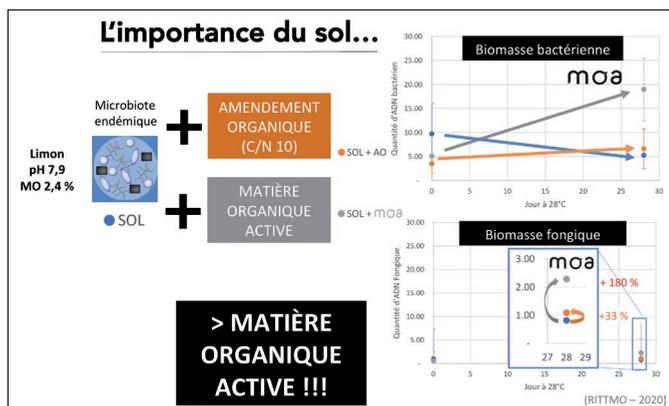


Figure 14

Résultats de l'expérience menée chez Frayssinet.

exemple activer la *biomasse*⁶ microbienne, soit plutôt les biomasses fongiques. C'est la démonstration de la puissance de la biostimulation.

Faune et flore du sol

L'acquis peut-être principal de ces travaux, au-delà de leurs effets pratiques, c'est de bien montrer le fonctionnement des plantes, qu'une plante injecte dans le sol de la matière active – entre 17 et 40 % des matières carbonées qu'elle prélève dans l'atmosphère parce qu'elle fixe le CO₂ de l'atmosphère. Ces matières vont être remises au niveau de la rhizosphère et constituer un milieu de culture pour les flores du sol. Ainsi, **la plante oriente toute la macrofaune⁷ et toute la flore du sol** (Figure 15).

6. Matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique utilisable comme source d'énergie.

7. Désigne les animaux dont la taille s'échelonne entre 4 et 80 mm, suffisamment grands pour être facilement distingué à l'œil nu.

2 La plante et le sol

2.1. Le métabolisme de la plante

La plante dans son environnement

On oublie souvent qu'en agriculture, la plante photo-synthétise et fabrique des sucres et qu'un tiers de ces sucres est renvoyé au sol. On peut se poser la question : pourquoi la plante envoie-t-elle un d'une énergie qu'elle est allée prendre au soleil, pour la déposer au niveau du sol ? Une des raisons est que pour l'agriculture, il est très important d'avoir des sols vivants.

Sur l'iceberg de la Figure 16, on voit la plante dans son habitat avec des parties racinaires souvent plus conséquentes que les parties extérieures. Très longtemps, on a oublié qu'une plante vivait avec les pieds dans le sol. On a construit des substrats qui aujourd'hui réalisent des produits standardisés et sans personnalité : cela vient justement de ce manque d'environnement. La plante n'était pas faite pour ça initialement : la génétique a aussi fait des modifications, mais l'environnement aussi.

Dans le sol, la plante est soumise à différents stress. *A priori*, l'environnement de la plante lui est plutôt hostile parce qu'une graine n'a pas choisi son environnement : on la met à un endroit et elle doit s'y développer. Elle a heureusement une puissance d'adaptation et d'évolution qui dépasse celles des organismes. Elle a une chimie intérieure qui est vraiment exceptionnelle ;

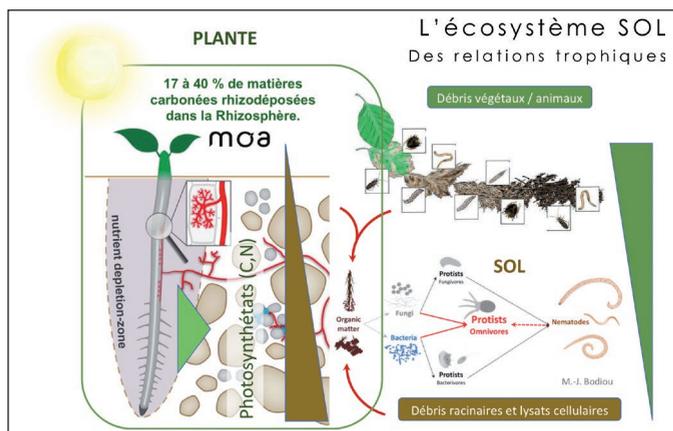


Figure 15

Relations et échanges dans le sol.

la pharmacopée et tous nos médicaments qui en découlent montrent bien la puissance métabolique d'une plante. Cette chimie interne lui permet sa puissance d'adaptation – en grande partie grâce à ses racines fonctionnelles.

Et il y a trois principaux stress connus. D'abord le **stress nutritionnel**, où la priorité est d'aller se nourrir, car elle ne peut pas se nourrir que du carbone de l'atmosphère, il faut qu'elle aille chercher tous les autres éléments *via* ses pieds, ses racines. Deuxième stress, le **stress biologique**, l'interaction avec les micro-organismes et macro-organismes dans l'environnement. Aujourd'hui, on a tendance à dire que les micro-organismes sont très bénéfiques. Des micro-organismes dont les virus font partie et je pense qu'après la Covid-19, on a bien compris que tous les micro-organismes ne sont pas bénéfiques ! Elle est aussi soumise au **stress abiotique** : réchauffement climatique, stress hydrique etc. C'est aussi pour la plante un vrai défi de s'adapter continuellement à un environnement, puisqu'elle peut prendre 15 jours de sécheresse suivis de 15 jours d'inondations, et souvent, y survivre !

Métabolites primaires et secondaires

Comment la plante est-elle capable de résister à ces stress ? Comme tout organisme, elle a des *métabolites*⁸ primaires et des métabolites secondaires (**Figure 17**) et une chimie extraordinaire.

8. Composé organique issu du métabolisme.

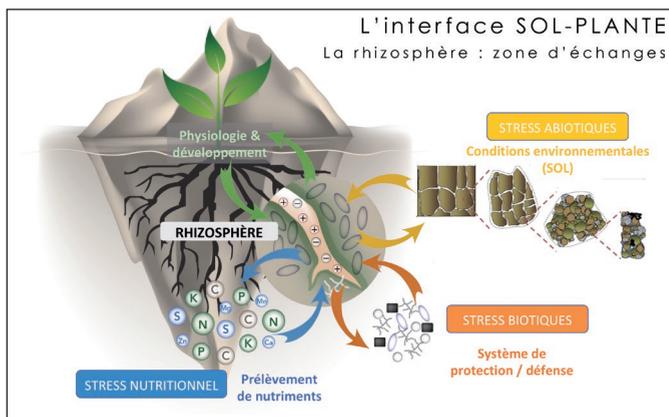


Figure 16

L'interface sol-plante et les trois types de stress.

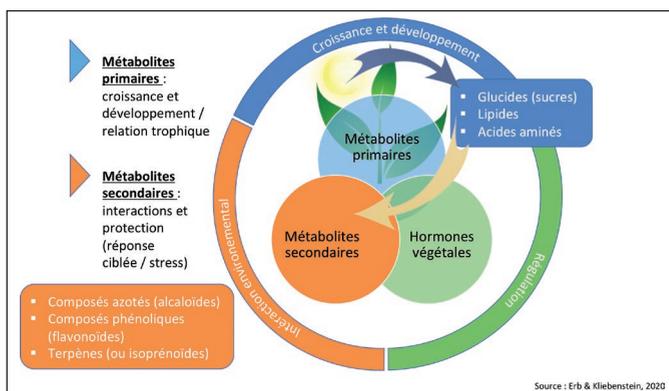


Figure 17

Les métabolites primaires et secondaires de la plante.

À la différence des organismes *hétérotrophes*⁹ que nous sommes, les végétaux sont capables de prendre le carbone de l'atmosphère et, avec l'énergie solaire, de le transformer en sucre : c'est véritablement le premier

9. Organisme incapable de synthétiser lui-même ses composants et qui recourt donc à des sources de matières organiques exogènes.

pas vers l'*autotrophie*¹⁰, donc l'indépendance énergétique. Ses métabolites primaires, ce sont les sucres, les lipides, les acides aminés, exactement comme nous, sauf que nous, nous nous les procurons par l'alimentation et elle, tous ces sucres, elle se les procure par l'atmosphère. Ce sont les **métabolites primaires** tout simplement parce qu'ils constituent la brique de base pour par la suite, **synthétiser les molécules beaucoup plus complexes que sont les hormones végétales**. On appelle cela des phytohormones, qui sont un pendant aux hormones humaines. Ce sont vraiment des molécules de croissance, de développement, donc de régulation à tout moment de sa vie et de son cycle (pour la reproduction, pour faire des racines) : tout est canalisé par les hormones végétales.

Elle a aussi, et c'est là où l'on puise d'ailleurs quasiment

10. Capacité à produire de la matière organique à partir de la réduction de matière inorganique et d'une source d'énergie externe.

tous nos médicaments, les **métabolites secondaires**. Les métabolites secondaires sont des composés azotés (des alcaloïdes), des composés phénoliques, qui sont de grandes familles (il faut imaginer le nombre de déclinaisons possibles de familles chimiques) et les terpènes. Ce sont les trois grandes classes des molécules qu'il y a dans les métabolites secondaires. Et ces métabolites secondaires sont vraiment les médiateurs chimiques pour l'interaction de la plante avec son environnement et mais aussi pour se défendre.

Les phytohormones

Quand on fait de la physiologie végétale, on voit toujours essentiellement la partie aérienne. Depuis un certain temps maintenant, on s'intéresse à la partie souterraine, bien qu'elle soit très compliquée. En considérant aussi les phytohormones, on s'aperçoit que l'on peut classer leurs composés moléculaires (Figure 18).

Dans les **phytohormones**, il y a les auxines, les cytokinines, les acides gibbérelliques et l'éthylène qui sont les grandes classes de phytohormones qui permettent la **croissance et le développement**, donc tout ce qu'on appelle les *stades phénologiques*¹¹ pour les plantes. Vous avez après tout ce qu'on appelle les **hormones dites « de stress »** qui vont donner des signaux à la plante : c'est l'acide abscissique, l'acide jasmonique et l'acide

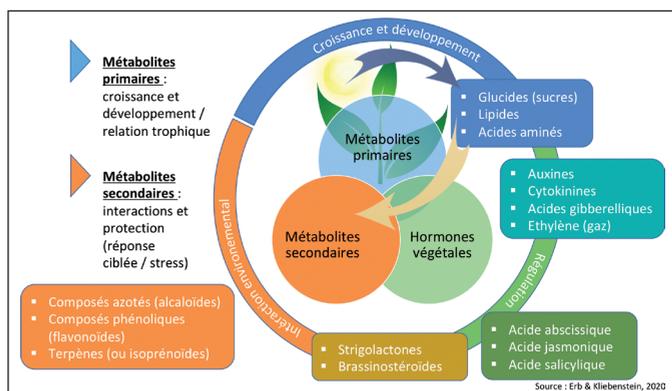


Figure 18

Les métabolites et phytohormones de la plante.

11. Enjeu, relatif à la phénologie, étude de l'influence des variations climatiques saisonnières sur les animaux et les végétaux.

salicylique (je ne rentrerai pas dans les détails car il s'agit là plutôt de la stimulation des défenses de la plante). Et vous avez des classes d'hormones assez récentes (il faut imaginer qu'elles ont été identifiées dans les années 70, par rapport aux autres plus précoces de plusieurs décennies) : ce sont les Strigolactones et les Brassinostéroïdes. Ces classes d'hormones sont, en tout cas les Strigolactones, **purement synthétisées et émises par les racines**, ce que l'on a mis beaucoup de temps à découvrir.

pour cela qu'elle a une coiffe, avec du *mucilage*¹². Cette coiffe est là pour prendre tout ce qui est problématique physique également. Ce sont des cellules exfoliées (c'est fait exprès, il n'y a pas de soucis : elle les perd) et il y a aussi du mucilage, des petits sucres (*Figure 20*). Pour faire ça, à ce niveau-là de la racine, ce sont des métabolites

12. Substance végétale qui gonfle au contact de l'eau en prenant une consistance visqueuse, parfois collante, qui protège aussi les racines de certaines espèces végétales.

2.2 Description de la rhizosphère

Organisation fonctionnelle de la racine

L'organisation fonctionnelle des racines est très précise. En effet, la racine c'est : un, **l'ancrage pour qu'elles tiennent debout** et résistent à pas mal de choses dans son environnement, et deux, le chemin par lequel elle est capable **d'acquérir son autonomie nutritionnelle**, puiser tous les éléments dont elle a besoin dans la solution du sol. Les fonctions dépendent du fragment de la racine que l'on étudie. On sait, par exemple, que tout ce qui va être la coiffe, en bas, a une fonction précise. Vous avez une zone intermédiaire, c'est la zone transitoire qui, elle, a une autre fonction et vous avez les poils absorbants, dont on parle souvent pour la nutrition, qui ont également une autre fonction. Nous allons donc essayer de les voir ensemble (*Figure 19*).

La coiffe est le morceau, l'extrémité pure de la racine, celle qui pénètre le sol. Donc elle a une force impressionnante et c'est

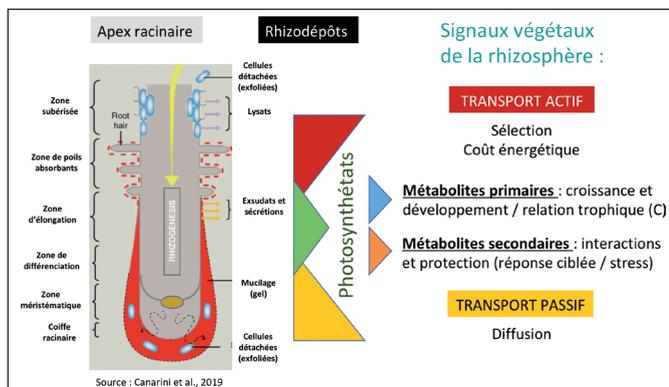


Figure 19

Organisation fonctionnelle de la racine.

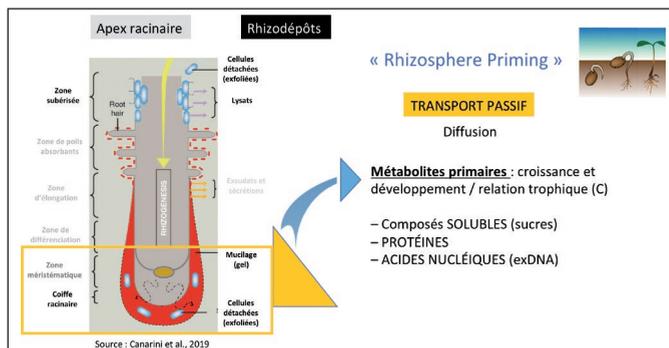


Figure 20

Focalisation sur l'extrémité de la racine.

primaires et de simples mécanismes de diffusion. Imaginez : vous mettez des petits sucres dans l'environnement, des petites protéines ou peptides et des petits acides nucléiques : c'est ce que nous allons appeler le phénomène de *rhizosphère-priming*. Ce processus va faire démarrer la vie tellurique pour les micro-organismes qui eux, n'ont pas accès au carbone sauf celui qu'on leur apporte. Là, la plante va donner du carbone, des acides aminés, des choses toutes prêtes pour ces organismes du sol. Si vraiment elle arrive dans un système plus compliqué, elle a cette capacité d'exsuder en produisant des *photosynthétats*¹³ mais de façon active. C'est un coût énergétique et métabolique pour elle, je dirais que c'est en cas de besoin nutritionnel.

La plante peut déposer encore plus de photosynthétats donc de carbone, *via* ces métabolites primaires (c'est la zone de transition qui fait ça) (Figure 21). Cette opération a

13. Partie de la sève transportée dans les tiges des plantes vasculaires.

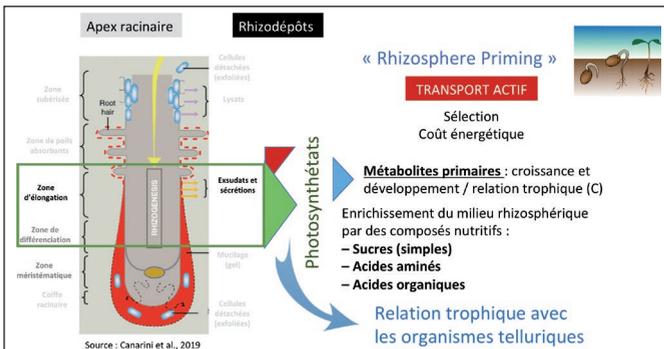


Figure 21

Focalisation sur la partie intermédiaire de la racine.

un coût métabolique qui fait souvent que la racine s'arrête de grandir à ce moment-là, car elle détourne son métabolisme pour cette sécrétion complémentaire.

Dialogue moléculaire et échanges

Les réactions que nous venons de décrire sont un moyen pour la plante de se faire connaître de son milieu de départ perturbé par son implantation et sa croissance, de donner du carbone et en retour, de recevoir d'autres nutriments des micro-organismes qui s'approchent de la racine, en particulier de s'approvisionner en azote et en phosphore (Figure 22).

Ces *exsudats*¹⁴ racinaires – ces rhizodépôts – sont la première brique du cycle des nutriments. Il faut ensuite que la plante puisse discriminer les bons parmi les micro-organismes qui l'entourent. Cette capacité est dévolue aux métabolites secondaires, notamment les composés phénoliques, composés azotés et terpènes, avec lesquels s'engage un dialogue moléculaire.

On connaît de mieux en mieux les médiateurs chimiques au niveau aérien ; au niveau souterrain, on commence à bien les décrire. Nous allons voir quelques exemples du rôle des métabolites secondaires. Mais tout a un vrai coût métabolique : la plante détourne son métabolisme primaire pour faire des métabolites secondaires ; de plus, elle induit un transport actif de ces molécules dans son environnement (Figure 23).

14. Liquide suintant d'un végétal.

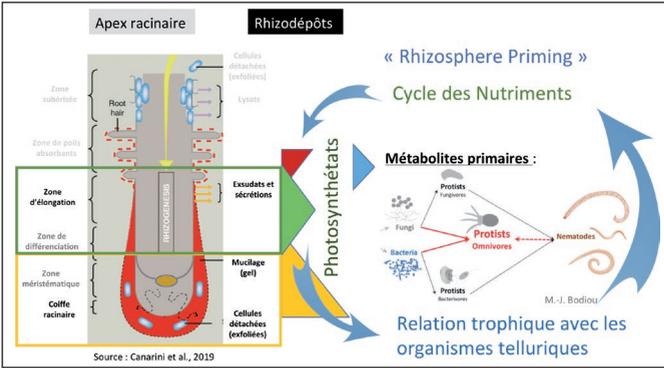


Figure 22

Cycle des nutriments de la racine.

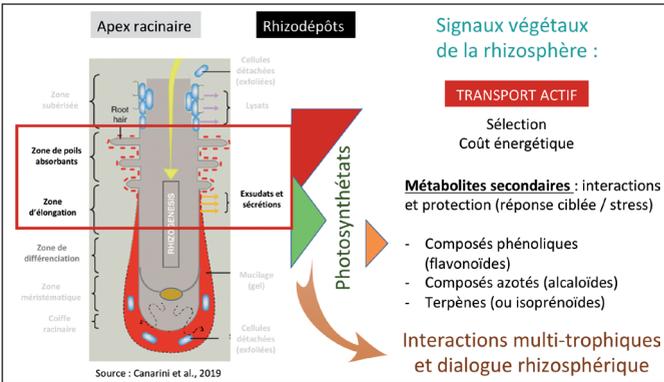


Figure 23

Transport actif au niveau de la racine.

Ces processus sont au cœur de la physiologie végétale. Dans les interactions rhizosphériques, la plante donne et en retour, elle attend quelque chose au niveau nutrition. Tout cela se fait par des dialogues moléculaires ; il y a une vraie interaction d'échange entre la racine et chaque micro-organisme qui est capable d'interagir *via* des molécules bien spécialisées (Figure 24). Voici deux exemples avec les symbioses.

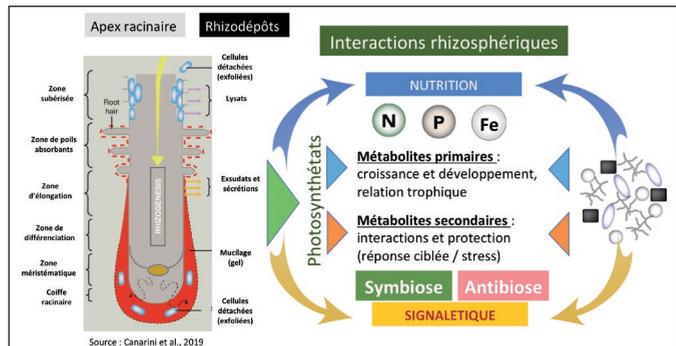


Figure 24

Les interactions rhizosphériques dans la racine.

2.3 Les symbioses

On utilise l'expression « stress nutritionnel » car la plante n'y réagit que si elle a besoin. Quand apparaît ce que l'on appelle la dépression nutritionnelle autour des racines, par suite d'un gros prélèvement de la plante, il faut aller puiser plus loin. Pour cet objectif, **la plante va envoyer un signal dans l'environnement** au niveau de la racine et des poils absorbants.

Cas des rhizobiums légumineuses

Dans le cas de *rhizobiums*¹⁵ légumineuses (Figure 25), on parle des *nodosités*¹⁶ sur les légumineuses. La plante envoie des flavonoïdes qui ne sont pas directement reconnus mais *via* la présence de rhizobiums dans l'environnement rhizosphérique, ils

activent certains des gènes de la plante. Ce mécanisme est orienté pour produire ce qu'on appelle des lipo-chitooligosaccharides, molécules qui vont être reconnues par le poil absorbant et former un organe commun mutualiste où la bactérie va apporter l'azote *via* la capture de l'azote (parce que ce sont des *diazotrophes*¹⁷) et la plante l'échanger contre du carbone. Il s'agit d'un échange nutritionnel entre la plante et la bactérie.

Cas des mycorhizes

Un second exemple est celui des *mycorhizes*¹⁸ (Figure 26), dont le genre le plus représentatif en agriculture sur des inoculants des microbiens, est le genre *glomus*. Exactement comme pour les bactéries, il y a un signal dans l'environnement : ce sont les Strigolactones, la

15. Bactéries aérobies du sol, qui peuvent créer des symbioses avec les légumineuses.
 16. Tubercule développé sur les racines légumineuses sous l'action de bactéries, qui participent à la fixation de l'azote.

17. Micro-organismes libres et capables de fixer l'azote tout en vivant en milieu naturel.
 18. Résultat de l'association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes.

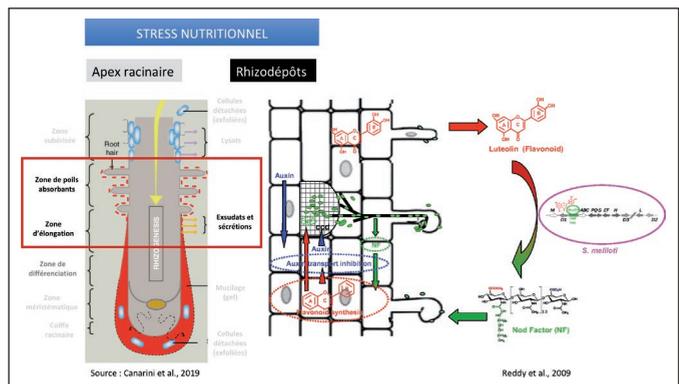


Figure 25
 Cas du rhizobium.

3 Communication souterraine

Sur le schéma de la **Figure 28**, je veux montrer qu'il y a un vrai système d'échange de molécules. On peut imaginer le réseau de molécules, comme comportant des composés organiques volatils comme le sont des phéromones ou des *kairomones*²⁰. Mais la même

20. Substance volatile ou mobile libérée dans l'environnement, qui déclenche une réponse comportementale chez une autre espèce.

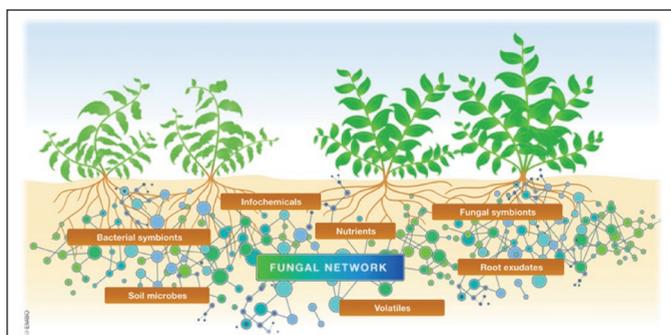


Figure 28

Schéma des acteurs des échanges souterrains.

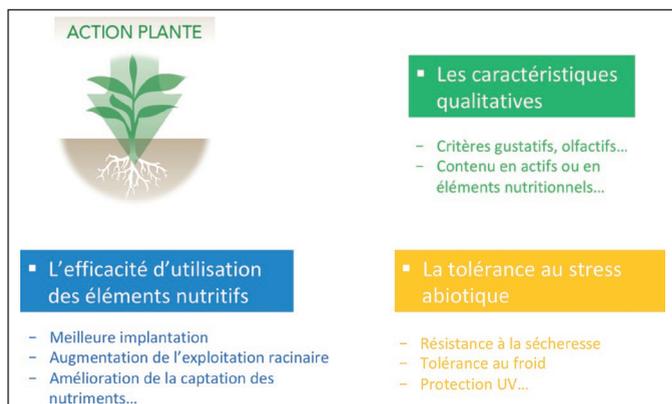


Figure 29

Les produits biostimulants et leurs actions sur les plantes.

chose existe au niveau souterrain : les organismes, au niveau du sol, se parlent aussi avec des composés organiques volatils. Ils se parlent également avec les *miRNA*²¹, donc les ARN messagers (des acides nucléiques), et tout cela pour un partage de nutriments. Il faut imaginer que tout le monde discute ensemble et s'entend pour se nourrir. C'est un habitat, **une niche écologique, le sol**.

4 Les biostimulants

4.1 Catégories de biostimulants

Aujourd'hui, en agriculture, il existe déjà des biostimulants commercialisés (**Figure 29**). Parmi les biostimulants, on compte tout ce qui est éléments nutritifs et tolérance au stress abiotique, mais pour des raisons réglementaires, on ne peut pas leur adjoindre les éléments qui touchent au stress biotique, domaine du biocontrôle.

4.2 Les symbioses

On vient de voir l'intérêt des symbioses comme stratégie de stimulation et beaucoup d'inoculants microbiens à bases d'organismes synthétiques sont commercialisés en agriculture. Il s'agit de biostimulants à action directe : on applique des micro-organismes en espérant avoir un effet bénéfique (**Figure 30**) et celui-ci dépend de l'état du récepteur.

21. Micro-ARN, catégorie de petits ARN.

Aujourd'hui, la stimulation va plus loin. Ce sont vraiment des interrupteurs moléculaires que l'on va aller chercher et c'est là tout l'intérêt de la biostimulation (Figure 31). C'est une réflexion plutôt sur les substances actives, donc chimiques. Cela est illustré par le rôle, au niveau des symbioses, de ce fameux lipo-chitoooligosaccharide qui lève le système de protection des plantes.

L'identification des substances actives est du domaine de la recherche. Aujourd'hui, des entreprises sont à la recherche, justement, de familles chimiques de lipo-chitoooligosaccharides (Figure 32). L'idée est qu'en mettant cette substance active dans l'environnement, au niveau agricole, il y a une efficacité meilleure que celle de l'organisme vivant tout simplement. Leur simple présence donnerait la signalétique aux organismes qui sont à proximité et capables de faire des symbioses, de s'associer aux plantes. Cette approche prometteuse est encore en recherche même si les premiers produits, en tout cas aux États-Unis, sont déjà commercialisés.

4.3 La rhizogenèse

Une autre voie est celle de la rhizogenèse (Figure 33). On sait que la plante se nourrit par ses racines : assez classiquement, si l'on veut mieux la nourrir, on augmente son potentiel racinaire en jouant sur le ratio d'hormones : les auxines et les cytokinines. En simplifiant, nous dirons que c'est l'auxine la phytohormone qui induit la stimulation de croissance racinaire.

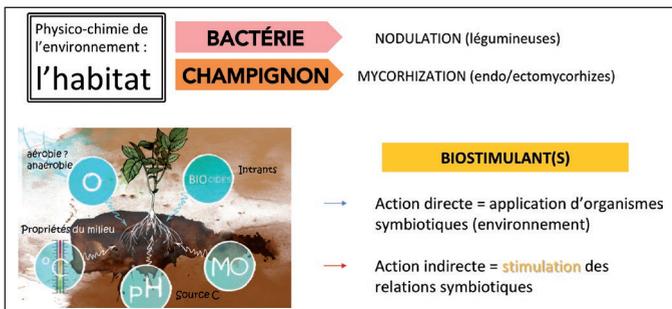


Figure 30

Les stratégies de stimulation.

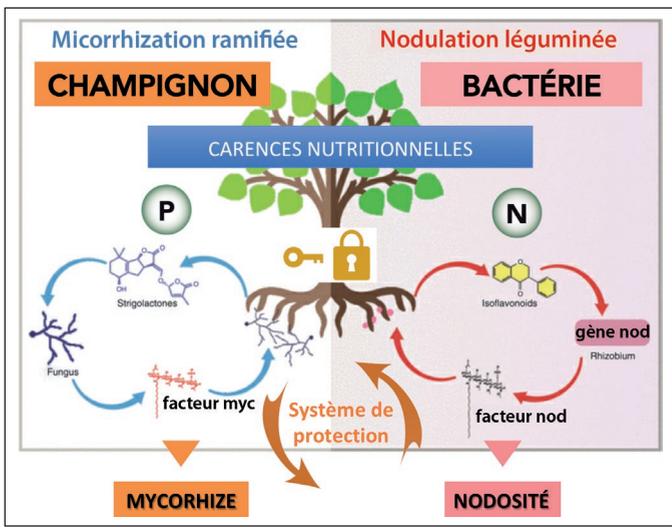


Figure 31

Principe des symbioses.

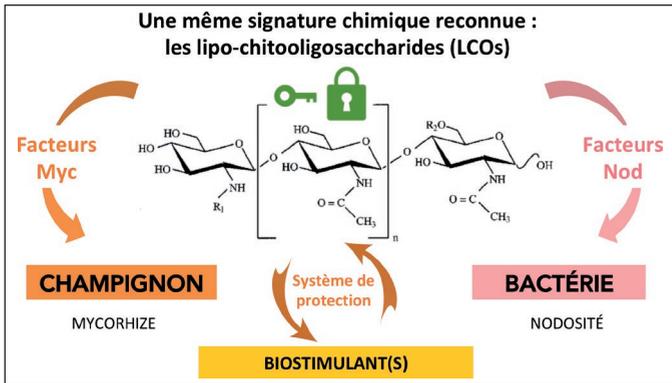


Figure 32

Action des lipo-chitoooligosaccharides dans le processus de symbiose.

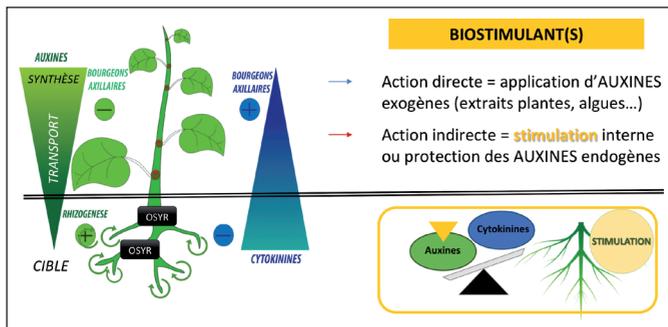


Figure 33

La rhizogénèse, une autre stratégie de stimulation.

4.4 Exemple de l'OSYR

De la même façon, à l'instar des biostimulants vivants, on peut aussi appliquer de l'auxine comme on le fait déjà des hormones de croissance. L'auxine, pour des raisons réglementaires ne peut pas être qualifiée de biostimulant mais des extraits de plantes ou d'algues qui sont commercialisés pour leur forte teneur en auxines le sont. Il y a aussi

la possibilité de jouer sur l'interrupteur moléculaire de la physiologie et stimuler de façon interne le flux d'auxine. C'est ce que réalise la substance active OSYR (Figure 34), qui il y a plus de vingt ans, a été travaillée à l'université de Montpellier, et dont Frayssinet possède la propriété industrielle. En fait, ce sont tout simplement des matières lignocellulosiques²² qui ont été sélectionnées, de petites molécules capables de pénétrer dans les racines et d'agir à l'intérieur et d'influencer le flux d'auxine.

D'un autre côté, nous avons les acides humiques et fulviques qui eux, sont des biostimulants mais qui vont plutôt cibler le sol.

Comment savoir que l'on active vraiment la partie plante, la croissance racinaire ? Par la comparaison des différentes conditions expérimentales : celles des essais au laboratoire, par exemple où il y a

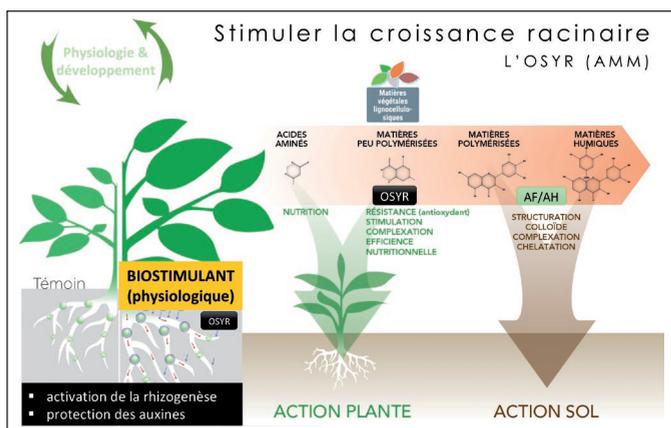


Figure 34

Principe de l'OSYR.

22. Matières très présentes dans la paroi des cellules des végétaux, du bois et de la paille.

effectivement beaucoup plus de racines, mais surtout celles des champs. On n'y ajoute pas d'auxine, elle ne peut donc pas être dégradée par les micro-organismes, la plante doit directement gérer son flux d'auxine au niveau des racines et à l'instant adéquat ; les photos parlent d'elles-mêmes (Figure 35).

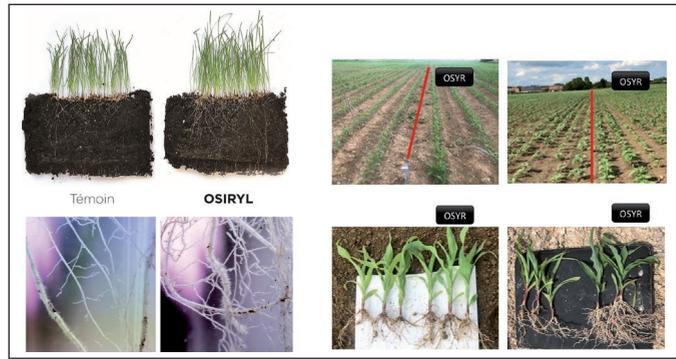


Figure 35

Résultats expérimentaux de l'effet OSYR en laboratoire et sur le terrain.

Enfin le départ pour la stimulation des sols !

Chez Frayssinet comme maintenant dans beaucoup d'installations, nombreux sont ceux qui commencent à croire à la biostimulation. C'est une discipline compliquée à maîtriser parce que les systèmes à étudier se trouvent sous terre. Même dans les projets de recherche, le problème est de pouvoir étudier les racines dans leur vrai contexte environnemental, avec des vrais sols, puisqu'il faut être soumis au terrain pour avoir une vraie efficacité.

L'objectif, c'est de sortir des produits qui soient **efficaces sur le terrain, pas seulement en laboratoire**, c'est aussi d'être capable d'avoir une idée de la texture, qui va jouer sur l'efficacité de ces produits, du pH du sol et aussi de son microbiote (Figure 36). **Il faut donc expérimenter avec des organismes vivants...** d'où la complexité. Mais de plus en plus de biostimulants qualifiés sont identifiés et ce sont ceux qui vont être qualifiés au-delà de l'identification chimique qui auront certainement la meilleure efficacité.

Malheureusement, le discours sur ce sujet est – comme souvent pour toute chose qui commence – trop léger sur ses bases scienti-

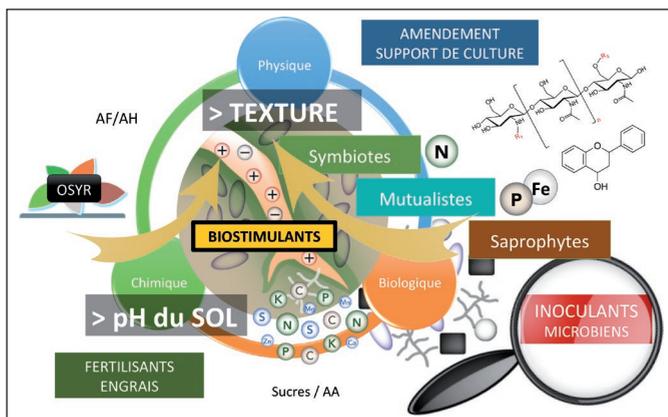


Figure 36

Paramètres et concepts liés à l'étude biostimulation. Aujourd'hui, après des décennies de recherche – en particulier à la faculté de Montpellier qui a été précurseur – on commence à parler concrètement des biostimulants.

riques. Le crédit scientifique – aussi en direction des agriculteurs – manque et c'est un gros frein au développement des applications. Quand il s'agit du biocontrôle avec des substances éprouvées et qui ont une efficacité vérifiée, **il est déjà difficile de diffuser l'information dans la confiance**. Aussi les efforts de communication vers les biostimulants, question moins connue, doivent-ils s'intensifier. Certes, les biostimulants sont soumis à des AMM²³, ce qui va dans le sens de la confiance, mais cela ne suffit pas. **Quel dommage car les biostimulants sont des leviers ultra-puissants, capables de perturber complètement une plante, donc d'accéder à des rendements (Figure 37) très performants...**

Un mot supplémentaire sur les programmes de recherche pour le domaine : notre connaissance actuelle montre qu'il est nécessaire de les développer conjointement avec la génétique car les phénomènes impliqués sont totalement génétiquement dépendants. **C'est vrai-**

