

Nouvelles approches en protection des plantes : les défis de la recherche

Jean-Marc Seng a été maître de conférences à l'université Paris-Saclay et est à l'heure actuelle chargé par la présidence de l'université de la mission d'introduction de l'entreprise au sein des parcours de licence. Il rencontre à nouveau dans ce domaine la recherche toujours nécessaire, mais en même temps suffisamment de perspectives d'application court terme pour réfléchir à la constitution d'entreprise.

Patrick Saindrenan est directeur de plusieurs groupes de recherche. Il travaille en particulier, dans un institut notable, ne serait-ce qu'au point de vue architectural, l'institut de biologie des plantes CNRS-université Paris-Sud Paris-Saclay. Son domaine est l'immunité végétale et qui traite plus spécifiquement des inducteurs de défense chez les plantes. Patrick Saindrenan est à l'heure actuelle président du comité des experts macro-micro-organismes de l'Anses et membre du comité scientifique du haut conseil des biotechnologies.

1 Les méthodes de lutte contre les parasites des plantes

1.1 Généralités

En guise d'introduction, citons les différentes méthodes nouvelles de luttés utilisées pour combattre les organismes parasites – champignons, bactéries, virus mais aussi les ravageurs c'est-à-dire les

insectes qui détruisent aussi bien les cultures abritant les plantes produites industriellement que les plantes moins industrielles (*Figure 1*). Tout ce beau monde est d'abord combattu par une chimie active – **les pesticides** – et puis éventuellement par un tas d'autres méthodes qui sont la lutte génétique, l'introduction de gènes de résistance dans les variétés, ou

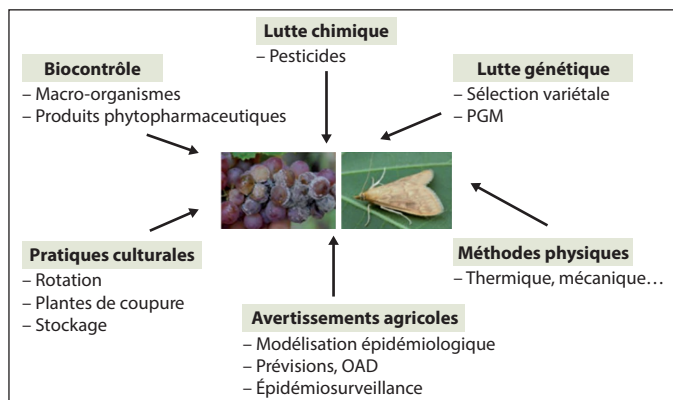


Figure 1

Panorama actuel de la protection des plantes.

par des méthodes physiques, des avertissements agricoles, des pratiques culturales (le simple fait de faire une rotation de culture permet de lutter contre les maladies).

1.2 Le biocontrôle

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser particulièrement au biocontrôle. Dans biocontrôle, il y a le mot biologie, donc le mot vivant, c'est pour cela que bien souvent, on a appelé cela de la lutte biologique. Toutefois, vous verrez qu'il n'y a pas que des organismes vivants qui sont impliqués.

Le contexte d'émergence du biocontrôle est connu de tous. Aujourd'hui, il y a une prise de conscience sociétale sur les conséquences de l'utilisation des pesticides, sur l'environnement et sur la santé humaine. Cette situation se traduit par un renforcement de la législation, c'est-à-dire l'autorisation de mise sur le

marché des molécules de chimie conventionnelle et la disparition progressive de leur utilisation. Non seulement on en *homologue*¹ moins, mais aussi certaines molécules ne sont pas ré-autorisées parce que des études plus fines montrent qu'il y a potentiellement des problèmes – de nature technique mais aussi quasi-politique. Le biocontrôle s'appuie également sur des décisions réglementaires gouvernementales qui fixent des directions et veulent favoriser des méthodes de lutte alternatives à la lutte chimique pour la protection de nos cultures ; ce sont les « plans *écophyotos*² ». Ces plans ont commencé il y a quelques années et vont se prolonger ; ils visent à réduire l'utilisation des molécules chimiques conventionnelles au profit de nouvelles méthodologies dont le biocontrôle fait partie.

Pour le définir, **le biocontrôle concerne l'ensemble des méthodes de protection des végétaux qui utilisent des mécanismes naturels**. Il vise la protection des plantes en privilégiant l'utilisation de mécanismes et d'interactions qui régissent les relations entre les espèces dans les milieux

1. Homologuer : reconnaître, déclarer quelque chose conforme aux règlements en vigueur, à certaines normes.

2. Plan écophyto : plan gouvernemental qui matérialise les engagements pris par le gouvernement et apporte une nouvelle impulsion pour atteindre l'objectif de réduire les usages de produits phytopharmaceutiques de 50 % d'ici 2025 et de sortir du glyphosate d'ici fin 2020 pour les principaux usages et au plus tard d'ici 2022 pour l'ensemble des usages.

naturels. Les méthodes de biocontrôle mettent en jeu des mécanismes plus complexes qu'une inhibition directe d'un bioagresseur et conduit à des études complexes. La recherche amont que l'on appelle aussi « **recherche fondamentale** » est un levier incontournable si l'on veut faciliter l'essor du biocontrôle ; il est absolument nécessaire que les laboratoires privés, publics, que la communauté internationale, travaille ces aspects-là. De façon plus concrète, le biocontrôle englobe deux grandes catégories (Figure 2) d'organismes ou de produits. La première, ce sont les **macro-organismes**, qui sont des organismes assez grands comme des invertébrés, des insectes, des acariens, etc. (Encart : *Insectes tueurs et insectes tués*).

La deuxième catégorie englobe les **produits phytopharmaceutiques**. C'est un nom qui peut faire penser à des molécules mais pas seulement. Cela fait aussi référence à des micro-organismes comme les bactéries, les champignons, les virus, à des substances d'origine naturelle – végétale, animale et minérale. Et finalement, cela comprend aussi des **médiateurs chimiques** tels que les *phéromones*³ et les *kairomones*⁴.

3. Phéromone : substance chimique ou mélange de substances produites par des glandes exocrines déclenchant des réactions physiologiques ou comportementales entre individus de la même espèce.

4. Kairomone : substances allélochimiques qui conduit à des interactions entre individus d'espèces différentes.

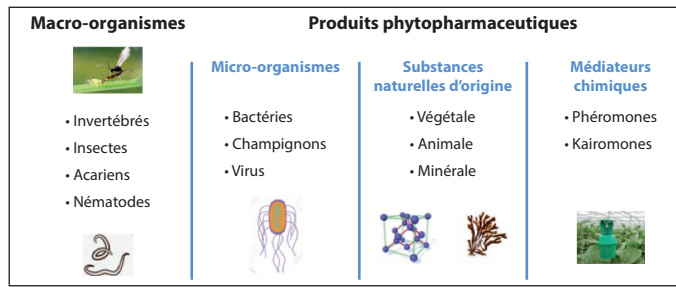


Figure 2

Les différentes catégories englobées par le biocontrôle.

INSECTES TUEURS ET INSECTES TUÉS

Pour qu'il n'y ait pas de confusion pour le public, on parle bien ici d'insectes tueurs, d'insectes qui ravagent les cultures. On parle donc d'acariens tueurs ou bien d'autres insectes. Il en est de même pour les nématodes qui sont de petits vers, des organismes utiles dans le biocontrôle.

L'utilisation volontaire d'insectes tueurs pour lutter contre les ravageurs est une pratique répandue mais peu connue du public.

Le principe d'action des *médiateurs chimiques*⁵ est amusant (pour les humains, pas pour les insectes) : le monde des insectes, **utilise les phéromones soit lorsque la femelle attire le mâle soit pour l'inverse**. L'idée est de favoriser les rencontres pour permettre effectivement la reproduction sexuée. Il suffit alors que l'homme copie des médiateurs chimiques comme les phéromones pour créer des leurres. En faisant ceci, le mâle croit qu'il y a une femelle à l'autre bout, ce qui veut parfois dire à 10 km de distance, et en réalité il ne rencontrera pas une femelle mais un piège, tout simplement. Ce leurre n'est

5. Médiateur chimique : substance synthétisée et libérée par une cellule (neuromédiateur, cytokine, prostaglandine, etc.), intervenant dans un processus de l'organisme (conduction nerveuse, inflammation, etc.).

pas une simple molécule chimique qui permettra de faire en sorte de neutraliser l'agresseur. Les phéromones sont un domaine en pleine expansion aujourd'hui.

Les stimulateurs de défense des plantes, ici les SDP, sont des substances naturelles, (sous-catégorie « Substances Naturelles » de la section « Produits Phytopharmaceutiques ») et opèrent selon des modes d'action complexes et passionnants sur lesquels nous reviendrons plus loin.

2 Les stimulateurs de défense des plantes (SDP)

2.1 Les différentes catégories de SDP

En introduction au monde des SDP, nous déclinons ici les différentes catégories actuellement sur le marché. Nous avons des **SDP d'origine**

biotique comme la chitine (**Figure 3**) qui est un *polymère*⁶ de N-acétylglucosamine, un *polysaccharide*⁷ que l'on trouve dans les carapaces de crustacés et également chez les insectes et les champignons. Nous avons des **SDP d'origine biochimique** comme l'acide salicylique (**Figure 4**), un composé phénolique très important chez les végétaux puisque c'est une hormone végétale qui induit les défenses chez les plantes. Nous avons des **SDP d'origine minérale** comme le phosphite dont il sera question ici (**Figure 5**) et des **SDP chimiques** comme

6. Polymère : molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. C'est une macromolécule constituée d'un enchaînement d'un grand nombre d'unités de répétition, d'un ou de plusieurs monomères, unis les uns aux autres par des liaisons covalentes.

7. Polysaccharide : sucre issu de la polycondensation d'une grande quantité de molécules d'oses, comme l'amidon ou la cellulose.

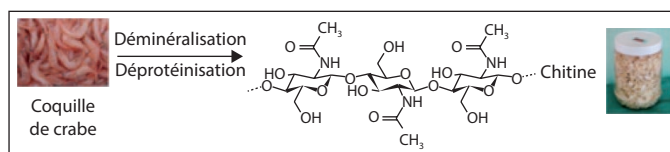


Figure 3

La chitine, un SDP biotique.

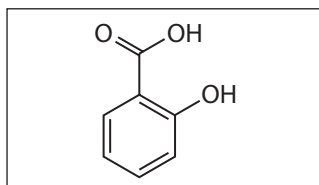


Figure 4

Acide salicylique, un SDP d'origine biochimique.

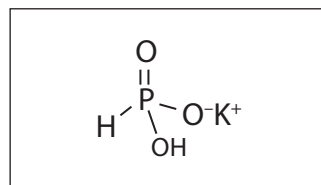


Figure 5

Phosphite, un SDP d'origine minérale.

le benzothiadiazole (Figure 6), analogue fonctionnel de l'acide salicylique.

2.2 Définition et caractéristiques des SDP

Les SDP fonctionnent en induisant un effet mémoire que les Anglo-Saxons appellent **priming**. La traduction française : **potentialisation** est peu utilisée. L'effet mémoire/priming place les plantes traitées dans un état de résistance au bioagresseur. À l'inverse des *fongicides*⁸ conventionnels, les SDP n'ont pas d'action fongicide par eux-mêmes ; ils n'ont aucun effet sur la croissance des champignons *in vitro* mais ils agissent, on pourrait dire, *via* la plante. D'ailleurs, **d'une manière générale, les SDP ont des activités indirectes** ; leur activité est fortement dépendante de la physiologie de la plante et du génotype de la plante considérée. C'est que tout simplement, **ils agissent à travers ce que l'on appelle le système immunitaire des végétaux**.

2.3 L'immunité végétale (Figure 7)

La première phase (étape 1) de l'immunité végétale est la **perception des motifs cibles** des interactions. Il en est ainsi par exemple de la chitine qui est perçue au niveau membranaire de la cellule par un censeur (en fait un récepteur). Cette étape de reconnaissance déclenche une cascade de signaux que l'on appelle

*transduction*⁹ du signal (étape 2) ou **modification de l'homéostasie** – c'est-à-dire de l'équilibre physico-chimique chargé de réguler les systèmes cellulaires de l'organisme. Sur la Figure 7, nous avons indiqué l'homéostasie phosphate, qui va réguler les niveaux de phosphate et l'homéostasie rédox, qui se réfère aux états oxydants ou réducteurs de la cellule.

Cette deuxième étape franchie, on arrive à **l'activation transcriptionnelle** (étape 3) qui, après modification de l'homéostasie (phosphate/rédox), donne le résultat final qu'est la production d'antibiotiques végétaux comme les phytoalexines ou des protéines à activité antimicrobienne comme les PR protéines. C'est l'étape 4. Le schéma serait

9. Transduction : transfert d'une information génétique d'une cellule à une autre par l'intermédiaire d'un vecteur.

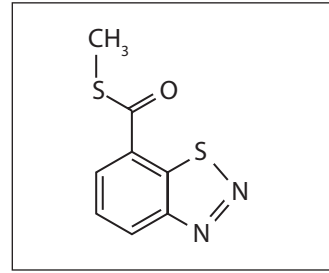


Figure 6

Benzothiadiazole, un SDP d'origine chimique.

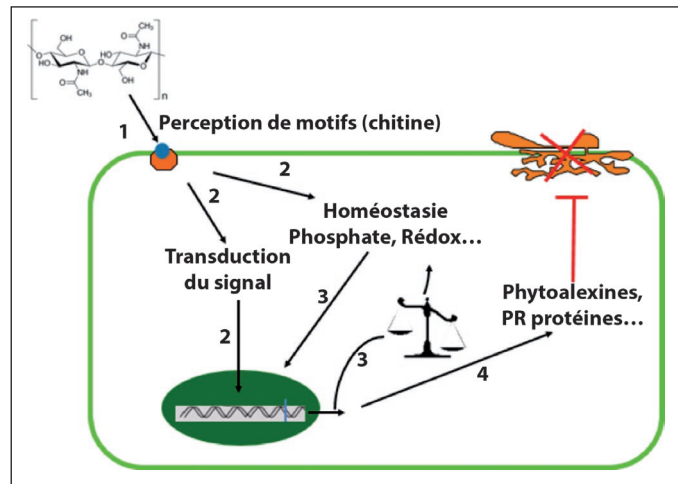


Figure 7

Schéma synthétique de l'immunité végétale.

8. Fongicide : qui détruit les champignons parasites

très simple si l'on connaissait l'étape 3 aussi bien que les autres. Mais pour la plupart des SDP actuellement utilisés, cette étape 3 est méconnue et il faut l'approfondir.

À titre d'exemple, présentons (**Figure 8**) un cas d'immunité végétale emblématique – la réaction d'hypersensibilité du tabac au virus de la mosaïque du tabac. Il s'agit d'une interaction entre le tabac, *Nicotiana tabacum*, qui possède un gène N de résistance, qui va interagir avec un gène du virus de la mosaïque du tabac, la *réplicase virale*¹⁰ et conduire à l'état de résistance par la réaction immunitaire. À gauche sur la (**Figure 8**) est montrée une feuille de tabac sensible, infectée par le virus ; l'aspect gaufré de la feuille indique que le virus s'est propagé et a formé une mosaïque, d'où le nom du virus. À droite, vous avez une feuille de tabac qui présente, elle, une petite

10. Réplicase virale : protéine virale essentielle dont le rôle est de copier le génome du virus.

*lésion nécrotique*¹¹ que l'on voit à peine. Elle marque le site de la réaction de résistance et indique la zone de contamination du virus. Sous lumière ultraviolette, on observe une auto-fluorescence au niveau de cette liaison nécrotique. Elle correspond exactement à la phase 4 indiquée plus haut – qui est l'accumulation de *scopolétine*¹², un antibiotique végétal qui a également des propriétés antivirales.

2.4 Deux agents de protection des plantes (SDP) : le phosphite et le silicium

Les SDP reposent sur l'exploitation du système immunitaire des plantes. Illustrons-le par deux substances minérales, le phosphite et le silicium, avec un accent sur le phosphite.

Le phosphite est la forme réduite du phosphate et se

11. Nécrose : mort d'un tissu vivant.

12. Scopolétine : composé phénolique du bois de chêne, présent à l'état de traces dans le raisin. Formule brute : C₁₅H₁₄O₄.

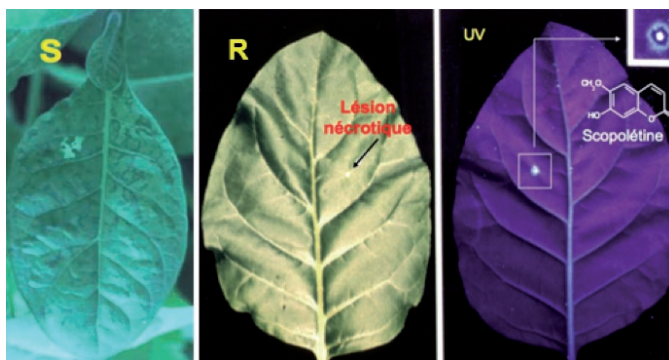


Figure 8

Feuille de tabac infectée par le virus de la mosaïque du tabac.

trouve dans les sols ; il a un degré d'oxydation de 3 alors que le phosphate a un degré d'oxydation de 5 (Figure 9). La concentration de phosphite dans les sols est très faible et le passage du phosphite au phosphate n'est pas facile parce qu'il correspond à une réaction très *endergonique*¹³ qui doit faire appel aux bactéries du sol capables d'effectuer cette transformation. Le phosphite est utilisé comme agent de protection des plantes depuis 1977 sous forme d'éthyle-phosphite d'aluminium et également sous forme de sel de phosphite. L'éthyle-phosphite d'aluminium rentre dans la catégorie des agents phytopharmaceutiques ; en revanche, les sels de phosphite rentrent eux dans la catégorie des agents de biocontrôle.

Le phosphite est un anti-oomycètes. Les oomycètes sont des champignons qui provoquent de nombreuses maladies très importantes comme le mildiou de la vigne, provoqué par le champignon *Plasmopara viticola* (Figure 10) ou le mildiou de la pomme de terre et de la tomate provoqué par le *Phytophthora infestans* (Figure 11) (Encart : Les horreurs dues aux champignons toxiques).

En bas à droite (Figure 12) est montré un « chancre de l'avocatier », provoqué par *Phytophthora cinnamomi*. La protection se fait avec des injections de phosphite dans le tronc par des seringues spéciales maintenues sous pression.

13. Endergonique : une réaction chimique est dite endergonique si elle nécessite un apport d'énergie extérieur pour se réaliser.

Comment le phosphite exploite-t-il le système immunitaire des plantes ? Entre le phosphite et le phosphate, il y a des analogies structurales et on s'attend donc à un jeu subtil entre phosphite et phosphate au niveau du métabolisme de la plante. Le phosphite, dérivé de l'acide phosphoreux H_3PO_3 , modifie l'homéostasie de la plante (Figure 13) et l'amène à un état latent, non visible, de résistance – le *priming*. Cet état latent permet à la plante de réagir plus rapidement et plus efficacement à une infection ultérieure ; l'action est donc séquentielle. On a *in fine* production de *phytoalexines*¹⁴ puis la réaction immunitaire (Figure 14).

14. Phytoalexine : substance antibiotique de défense produite par les plantes vertes lorsqu'elles sont attaquées par un champignon ou une bactérie.

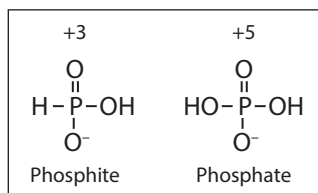


Figure 9

Molécules de phosphite et de phosphate avec leur nombre d'oxydation.



Figure 10

Mildiou de la vigne - *Plasmopara Viticola*.



Figure 11

Mildiou de la pomme de terre et de la tomate - *Phytophthora infestans*.



LES HORREURS DUES AUX CHAMPIGNONS TOXIQUES

Juste quelques mots à propos de ce *phytophthora infestans*. Il faut savoir qu'en 1850, la famine irlandaise qui a provoqué un million de morts et un million cinq cent mille immigrés à travers le monde (surtout aux États-Unis), est due à ce champignon.

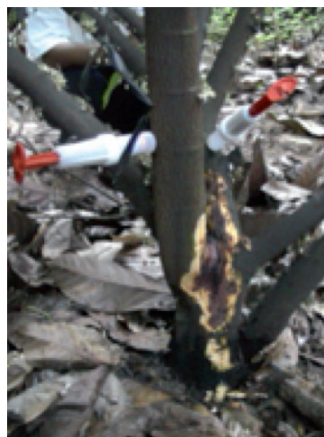


Figure 12

Le chancre de l'avocatier – *Phytophthora cinnamomi*.

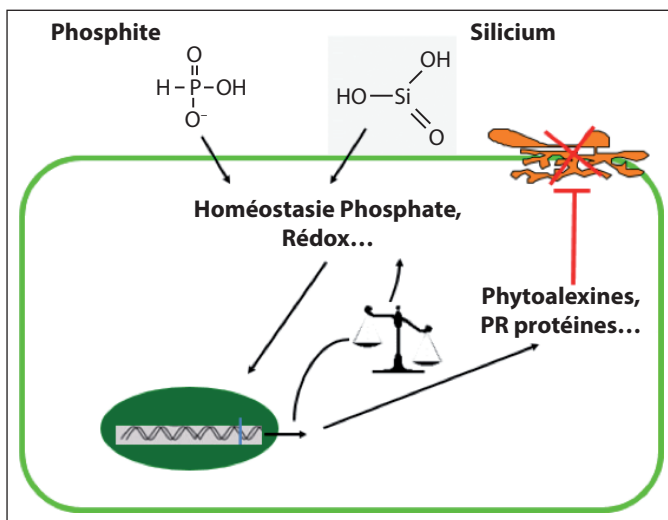


Figure 13

Rôle du phosphite et du silicium dans l'immunité végétale.

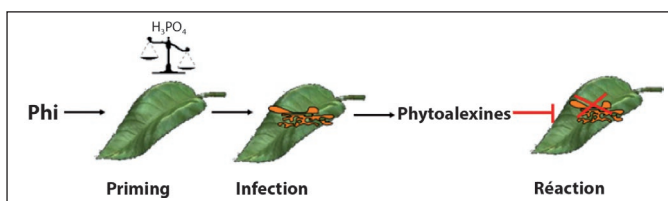


Figure 14

Schéma de la réaction immunitaire.

Il est remarquable que **l'effet de ce SDP particulier est fortement dépendant de la physiologie de la plante** et en particulier, de la teneur en phosphate et des géotypes considérés. On devine déjà le parti que l'on peut en tirer en pratique pour la protection : on peut modifier ou pas la teneur en phosphate par des *amendements*¹⁵ et ainsi définir l'efficacité du phosphite. En fait, la plupart des SDP ont bien sûr des actions indirectes ; souvent, les actions directes des phosphites sont seulement

15. Amendement : opération visant à incorporer une substance dans le sol afin d'améliorer les propriétés physiques de ce sol.

*fongistatiques*¹⁶. Elles peuvent être réversibles contrairement à celles des fongicides conventionnels et peuvent être inversées par un apport de phosphate.

Le deuxième cas annoncé de SDP d'origine minérale est le silicium. On entend peu parler du silicium comme agent SDP en lutte biologique ; pourtant, c'est le métalloïde le plus important de la croûte terrestre après l'oxygène. Il existe sous forme de quartz (c'est la silice SiO_2) ou de silicate lié à

16. Fongistatique : qui inhibe le développement et la reproduction des champignons.

différents métaux comme par exemple l'aluminium. Le silicium est en fait immobile, non fonctionnel dans les sols, c'est seulement l'acide silicique, de formule H_4SiO_4 (Figure 15), qui sous forme monomérique non chargé à pH 9 est absorbé par les plantes. Une fois absorbé, cet acide silicique se polymérise dans la plante en silice amorphe (Figure 16). Cela se produit en général pour des concentrations supérieures à 2 mM.

Autant les réactions concernant l'action du phosphite sont claires, autant celles du silicium sont controversées.

Pour certains, le silicium constitue une barrière physique à la pénétration. La Figure 17 montre le riz en culture. Sur la partie gauche des plantes non traitées, le champignon qui est un champignon particulier du riz, pénètre sans problème alors que lorsque vous traitez avec du silicium sous forme de silicate d'aluminium par exemple, une couche physique se forme et joue un rôle d'effet *filmogène*¹⁷ protecteur.

Pour d'autres, le silicium est un agent de priming. Il induit une mémoire latente qui permet à la plante de réagir plus rapidement et plus efficacement à une infection ultérieure. Le silicium jouerait un rôle modulateur au niveau de l'interface apoplasme¹⁸ - paroi

17. Filmogène : qui peut porter un film ayant une fonction de filtration.

18. Apoplasme. Pour ceux qui ne connaissent pas trop les végétaux, l'apoplasme est l'espace qui se trouve entre la membrane cellulaire et la paroi, qui n'existe bien évidemment pas chez les mammifères, c'est la partie apoplastique.

cellulaire. Le silicium s'incrusterait dans cet espace et pourrait interférer avec les armes du champignon.

Ces descriptions permettent de percevoir les programmes de recherche en cours sur les SDP concernant plus particulièrement le phosphite et le silicium. En Europe, nous avons enregistré trente produits à base de sels de phosphite en tant que fongicides et huit produits à base de silicate d'aluminium comme insecticides. En ce qui concerne la mauvaise connaissance de

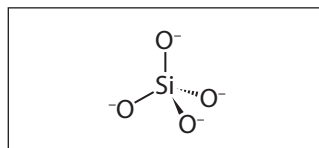


Figure 15

Molécule SiO_4^{4-}

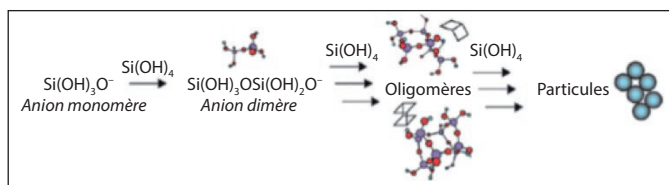


Figure 16

Polymérisation de l'acide silicique en silice amorphe.

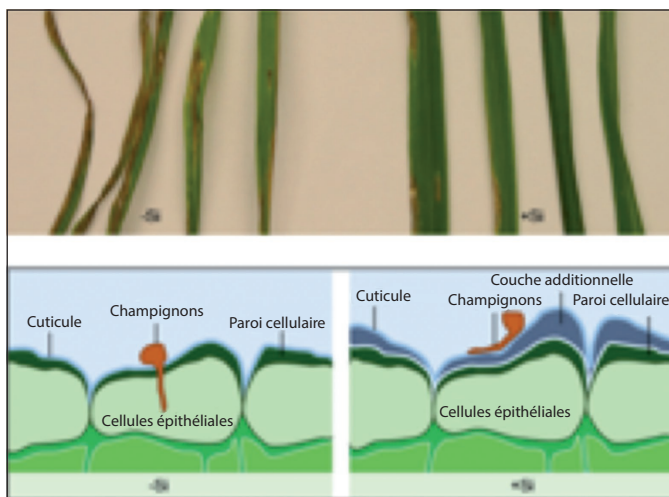


Figure 17

Réaction immunitaire du riz.

l'étape 3 mentionnée plus haut sur la description du système immunitaire et de sa stimulation par les SDP, on identifie actuellement le mode d'action de l'homéostasie phosphate ainsi que son site d'action. Ces résultats sont le fruit de trente ans de recherche autant dans le domaine de la recherche académique que dans l'agrochimie (Rhône-Poulenc et Bayer Crop Science). La mobilisation à la fois de la recherche fondamentale et de la recherche agrochimique a payé !

Pour le silicium (silicate d'aluminium ou silice) nous en sommes encore aux balbutiements. C'est que si ces produits marchent bien en laboratoire, il est très difficile de les maîtriser sur le terrain. Il faut en effet faire intervenir des paramètres difficiles à atteindre sur l'état physiologique des plantes, des petites variations de la pression d'inoculables¹⁹.

2.5 Complexités liées aux nouvelles méthodes de protection des plantes

Difficultés générales

Après les SDP, prenons un petit peu de champ et abordons le contexte général de protection des plantes par les méthodes biologiques à comparer aux méthodes traditionnelles d'intrants chimiques. Il s'agit encore d'utiliser des molécules ou des micro-organismes ou des organismes complexes mais il va falloir

gérer une efficacité moindre et variable en plein champ par rapport aux fongicides conventionnels.

Il est absolument indispensable d'intégrer que les défis viennent de ce :

- qu'on n'obtient pas les mêmes niveaux d'efficacité ;
- que la durée d'action est variable. Le problème des molécules de la chimie conventionnelle qui a été soulevé, c'est que parfois, les molécules sont stables et garantissent une durée d'action longue. Ici, nous avons des durées d'actions variables, certaines peuvent être longues, d'autres beaucoup plus courtes, cela va dépendre du type d'organisme ou du type de molécule que l'on va utiliser. C'est un autre facteur d'incertitude ;
- qu'il va falloir gérer la haute technicité d'emploi ; il va falloir des modalités de traitement particulières. L'agriculture ne pourra pas utiliser les méthodes classiques, conventionnelles. On ne met pas des organismes vivants dans un récipient et on ne gère pas de la même façon, au moment de pulvériser au champ un organisme vivant par rapport à une molécule classique et le positionnement, c'est-à-dire à quel moment je l'applique (qui doit aussi être très précis) ;
- se rajoutent des complexités dépendant spécifiquement des molécules. Par exemple, pour les lipopeptides²⁰ bac-

19. Inoculable : se dit d'une substance qui peut être injectée dans le corps d'un être vivant et qui peut aussi bien guérir que rendre malade.

20. Lipopeptide : molécule composée d'un lipide (corps gras, molécule hydrophobe fondamentale dans la composition de la matière vivante) et d'un peptide (polymère d'acides aminés).

tériens, il va falloir les produire en masse et mettre au point leur synthèse – ce qui n'est pas une chimie facile car ce sont des molécules très sophistiquées. Il faudra les formuler, c'est-à-dire conditionner la matière active avec les *adjuvants*²¹, les coformulants nécessaires à leur utilisation – efficacité intrinsèque et biodisponibilité. Tout ceci repose sur des technologies particulières.

Ce qu'il faut retenir à ce stade c'est que **ces nouvelles méthodes se développent dans la complexité**. D'ailleurs, les méthodes de lutte chimique ne disparaîtront pas, en tout cas pas de façon disruptive, pas en une seule fois. L'arrivée de nouvelles méthodes est d'abord l'accompagnement de la diminution de la chimie conventionnelle et l'on doit absolument rendre compatibles les micro-organismes et les méthodes conventionnelles de lutte. C'est la façon de garantir à un agriculteur de produire une denrée commercialisable avec une certaine quantité.

Difficultés spécifiques au biocontrôle

Comme dernière thématique du chapitre, abordons le biocontrôle qui nous occupe personnellement depuis quatre ans.

La démarche pour développer des agents de biocontrôle est complexe – un chemin semé d'embûches ! **Il faut en permanence cribler et identifier**

de nouvelles espèces, voire de nouveaux genres d'agents de biocontrôle ; il y a une recherche active à ce niveau-là. Ensuite, la variation du vivant est au cœur du biocontrôle : **des résistances des cibles apparaissent** régulièrement et s'y adapter n'est pas automatique. Un exemple : l'insecte cible, prenons la *sésamie*²², mute de façon que la *toxine Cry*²³ ne soit plus efficace – une résistance à l'agent de biocontrôle apparaît. Une mutation peut aussi intervenir sur la partie utile, l'agent de biocontrôle lui-même.

Ensuite, il faut considérer qu'il y a **généralement plusieurs souches de l'agent pathogène à combattre**. Dans un champ, il y a des milliers d'individus mais surtout de nombreuses souches différentes, (c'est-à-dire que les individus appartiennent à la même espèce mais sont des individus différents). On ne doit pas sélectionner un agent de biocontrôle efficace contre un nombre limité d'individus ; il faut couvrir la totalité des *pathogènes*²⁴ puisque tous les individus appartenant à l'espèce portent le pathogène ciblé.

Le biocontrôle n'est pas encore étendu aux grandes cultures. **Le domaine des grandes cultures est un domaine compliqué car c'est un milieu ouvert**. Par conséquent, il est plus facile de travailler dans des serres, dans

21. Adjuvant : produit chimique qui améliore le pouvoir de dispersion, d'étalement ou d'adhérence des pulvérisations de pesticides sur les plantes.

22. Sésamie : papillon qui au stade larvaire est un ravageur du maïs.

23. Toxine Cry : protéine toxique sécrétée par la bactérie *Bacillus thuringiensis*.

24. Pathogène : qui peut causer une maladie.

des environnements contrôlés en température et en humidité parce qu'on a une maîtrise du vivant. En effet, on voit bien, et d'autant plus ces dernières années, que l'on a des changements au niveau agricole, climatique, qui sont très importants et qui vont être évidemment préjudiciables à l'introduction d'un organisme utile en grande culture.

Pour vous donner un ordre d'idée, nous avons répertorié en Europe 22 micro-organismes, 4 virus et 6 extraits de plantes qui sont effectivement enregistrés et autorisés pour différents usages en protection des plantes. C'est une approche statistique globale qui ne fait donc pas énormément d'organismes ou de molécules et qui en est encore à ses débuts.

Enfin, dernier point, derrière cette complexité, il y a des approches pluridisciplinaires, combinaisons de Chimie, Biologie et Agronomie ; c'est une nouvelle façon de travailler, une nouvelle façon de mettre bout à bout des expertises nécessaires pour parvenir à mettre au point des agents de biocontrôle. Les industriels de l'agrochimie sont d'abord des chimistes bien sûr, mais ce sont aussi des gens qui se sont mis à la biologie pour certains départements qu'ils ont développés, ce qu'on appelle les *biologics* et qui sont déjà en train d'essayer de combiner ces différents aspects. Les laboratoires publics ne sont pas en reste, les instituts techniques non plus et il y a du travail pour beaucoup d'organisations. C'est le futur !

Étudiants ! ... l'avenir est à vous !

Les pratiques de biostimulation et de biocontrôle telles qu'exposées dans ce chapitre appellent la **priorité sur l'efficacité** dont l'insuffisance est aujourd'hui le frein numéro un au développement. Certes, intrinsèquement, leur efficacité est inférieure à celle des méthodes conventionnelles mais il faut compenser ce point en allant les traquer dans leur complexité.

Pour que ces méthodes alternatives de protection des plantes, biocontrôle et biostimulation, soient mises en œuvre dans les années à venir, il y a deux grandes conditions :

– il faut **utiliser plusieurs méthodes conjointement**. C'est une différence de taille avec l'emploi de la chimie conventionnelle. Tous les moyens doivent solliciter dans l'ensemble des étapes

de la production industrielle de la plante ;

– les méthodes doivent être **compatibles avec les développements technologiques**. Ce n'est pas seulement la recherche amont qui est impliquée mais aussi les technologies de formulation et de stockage. Nous devons rester adaptés à une agriculture qui produit en masse. Ces deux conditions sont nécessaires pour que le biocontrôle soit intégré dans des modèles de production agricoles déjà existants de façon à pouvoir assurer les meilleures conditions aux transitions vers le changement. Nous ne croyons pas à une rupture brutale, surtout pas en ce qui concerne les grandes cultures.

L'agriculture, on l'a vu tout au long de ce chapitre, s'aventure dans la complexité : maîtriser et d'abord pour cela comprendre la biologie du milieu qui héberge et nourrit les plantes. **Ces champs d'investigation nouveaux nécessitent d'appuyer la recherche**, de financer et mettre en place de nouveaux projets de recherche, d'amener à faire travailler ensemble des disciplines qui ne se parlent pas assez. Nous aurons à passer par des rapprochements entre des équipes qui devront assimiler un même langage, partager un socle d'informations communes pour ensuite transmettre leur expertise.

Nous sommes franchement très optimistes, la période qui s'ouvre s'annonce complexe et passionnante !

