



Notes et études socio-économiques

CENTRE D'ÉTUDES ET DE PROSPECTIVE

n° 40 - Mai 2016



Ludovic Faessel, Clément Tostivint

- **Les produits de stimulation en agriculture : un état des connaissances**

NESE n° 40, Mai 2016, pp. 7-39

CENTRE D'ÉTUDES ET DE PROSPECTIVE

SERVICE DE LA STATISTIQUE ET DE LA PROSPECTIVE

Présentation

Notes et Études Socio-Économiques est une revue du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, publiée par son Centre d'Études et de Prospective. Cette revue technique à comité de rédaction se donne pour double objectif de valoriser des travaux conduits en interne ou des études commanditées par le ministère mais également de participer au débat d'idées en relayant des contributions d'experts extérieurs. Veillant à la rigueur des analyses et du traitement des données, elle s'adresse à un lectorat à la recherche d'éclairages complets et solides sur des sujets bien délimités. D'une périodicité de deux numéros par an, la revue existe en version papier et en version électronique.

Les articles et propos présentés dans cette revue n'engagent que leurs auteurs.

Directrice de la publication :

Béatrice Sédillot, MAAF-SG-SSP, Chef du Service de la Statistique et de la Prospective

Rédacteur en chef :

Bruno Hérault, MAAF-SG-SSP, Chef du Centre d'Études et de Prospective

Secrétaire de rédaction :

Florent Bidaud, MAAF-SG-SSP-CEP, Centre d'Études et de Prospective

Comité de rédaction :

Florent Bidaud, MAAF-SG-SSP-CEP, Centre d'études et de prospective

Didier Cébron, MAAF-SG-SSP-SDSAFA, Sous-directeur de la SDSAFA

Pierre Clauquin, MAAF-SG-SSP-CEP, Chef du BPSIE

Bruno Hérault, MAAF-SG-SSP, Chef du Centre d'études et de prospective

Pascale Pollet, MAAF-SG-SSP-SDSSR, Sous-directrice de la SDSSR

Béatrice Sédillot, MAAF-SG-SSP, Chef du Service de la Statistique et de la Prospective

Composition : SSP - ANCD

Impression : AIN - Ministère de l'Agriculture

Dépôt légal : à parution

ISSN : 2259-4841

Renseignements et diffusion : voir page 4 de couverture

Les produits de stimulation en agriculture. Un état des connaissances sur les nouveaux intrants visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes

Ludovic Faessel¹, Clément Tostivint²

Résumé

Ces dernières années, divers produits et substances visant à améliorer le fonctionnement du sol, de la plante ou les interactions entre sol et plante à travers la stimulation de processus biologiques, ont fait leur apparition sur le marché des intrants agricoles. Ces « produits de stimulation » suscitent l'intérêt des acteurs du monde agricole. Dans le cadre du « projet agro-écologique pour la France » et du plan Écophyto, le ministère en charge de l'agriculture a commandité une étude visant à fournir un état des lieux des connaissances disponibles sur ces produits de stimulation. L'article propose une synthèse des principaux résultats scientifiques et techniques de cette étude, réalisée en 2014. Il dresse un panorama de ces produits, détaille leurs revendications agronomiques et leurs modes d'action, de façon à mieux apprécier leur efficacité, les risques associés et leur possible contribution à la transition agro-écologique.

Mots clés

Stimulateurs de défense des plantes (SDP), biostimulants, phytoprotection, fertilisation, intrants, agro-écologie

**Le texte ci-après ne représente pas nécessairement les positions officielles
du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.
Il n'engage que ses auteurs.**

1. Ludovic Faessel, RITTMO Agroenvironnement, Ingénieur de recherche – au moment de l'étude.

2. Clément Tostivint, Bio by Deloitte – Deloitte Sustainability Services – ctostivint@bio.deloitte.fr

Introduction

Une gamme très large de produits et substances visant à améliorer le fonctionnement du sol, de la plante ou les interactions entre sol et plante s'est récemment développée sur le marché des intrants agricoles. Ces produits apportent des solutions souvent innovantes dans le domaine de la fertilisation et de la protection des cultures, avec un mode d'action commun passant par la stimulation de processus biologiques au niveau du sol ou de la plante.

Face à un facteur externe affectant la production agricole, ils entendent agir sur la capacité des systèmes biologiques à s'adapter (stimulation des défenses naturelles de la plante, meilleure absorption des nutriments). De par leurs modes d'action originaux, ces « produits de stimulation » sont parfois qualifiés « d'alternatifs », dans la mesure où ils se différencient, par leur action indirecte à travers la plante ou le sol, d'autres solutions à action directe (par exemple une action biocide ou un apport d'engrais), considérées comme plus conventionnelles.

Dans un contexte où les attentes sociétales sur la durabilité des systèmes agricoles sont de plus en plus fortes, les produits de stimulation suscitent l'intérêt des acteurs du monde agricole. La stimulation des défenses naturelles des plantes peut constituer une option pour aller vers la réduction de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. Les biostimulants peuvent quant à eux être un moyen pour limiter les apports en engrais minéraux.

Dans le cadre du « projet agro-écologique pour la France » et du plan Écophyto, le ministère en charge de l'agriculture a souhaité avoir une vision plus précise de la situation et des connaissances disponibles sur ces produits de stimulation. Il a demandé à *BIO by Deloitte* et *RITTMO Agroenvironnement* de réaliser une étude centrée sur deux types de produits : les Stimulateurs de Défense des Plantes (SDP) utilisés dans le cadre de la phyto-protection et les biostimulants utilisés dans le domaine de la fertilisation¹.

Après avoir présenté ces produits – terminologie (1), origines (2), revendications agronomiques (3) et modes d'action (4) –, le présent article propose des éléments d'évaluation de leur efficacité (5) et des risques qui leur sont associés (6), de façon à amorcer une réflexion sur leur possible contribution au déploiement de la transition agro-écologique.

1. Faessel L., Gomy C., Nassr N., Tostivint C., Hipper C., Dechanteloup A., 2014, *Produits de stimulation en agriculture visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes. Étude des connaissances disponibles et recommandations stratégiques*, rapport d'étude réalisé par Bio by Deloitte et RITTMO Agroenvironnement pour le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 148 pages, téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.agriculture.gouv.fr/ministere/produits-de-stimulation-en-agriculture-visant-ameliorer-les-fonctionnalites-biologiques>.

1. La terminologie associée aux produits de stimulation

La terminologie relative aux produits de stimulation s'avère complexe et diversifiée. Elle peut en outre varier de manière significative en fonction du registre : articles scientifiques, textes réglementaires ou documents commerciaux. Voici quelques exemples de termes identifiés :

- stimulateur de défense des plantes : « éliciteur », « inducteur de résistance », « SDN », « SDP » ;
- biostimulant : « activateur de sol », « agent nutritionnel », « biofertilisant », « conditionneur de plantes », « nutriciteur », « phytostimulant », « physioactivateur » ;
- concepts associés aux produits de stimulation en général : « biointrant », « bionutrition », « bouclier naturel », « PGPR » (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*), « PGPF » (*Plant Growth Promoting Fungi*).

Il faut souligner que nombre de ces termes ne possèdent pas de définition réglementaire ou à caractère officiel. Les définitions retenues dans le présent article sont celles :

- du réseau Elicitra² pour les Stimulateurs de Défense des Plantes (SDP) : « Toute substance ou micro-organisme vivant non pathogène capable *d'induire (ou de préparer à l'induction) des réponses de défense chez une plante qui conduisent à une meilleure résistance de la plante face à des stress biotiques* » (RMT Elicitra, 2013) ;
- de l'EBIC³ pour les biostimulants : « Un matériel qui contient une (des) substance(s) et/ou micro-organisme(s) dont la fonction, quand appliqué aux plantes ou à la rhizosphère, est *de stimuler les processus naturels pour améliorer/avantager l'absorption des nutriments, l'efficacité des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques, et la qualité des cultures*, indépendamment du contenu en nutriments du biostimulant » (EBIC, 2014).

2. Origine et nature des produits

Le tableau 2 (cf. annexes en page 26) présente une liste non exhaustive des différentes *substances actives* et de leurs origines, sans considérer le *formulant* du produit (voir l'encadré 1 pour une définition de ces notions). Cette liste a été dressée grâce à un important travail de recherche d'informations : articles scientifiques et rapports (notamment Thakur et Sohal, 2013 ; Terres d'innovation, 2009 ; Dufour, 2011 ; Du Jardin, 2012 ; EBIC, 2011 ; Khan *et al.*, 2009 ; Faessel, 2008 ; Walters *et al.*, 2013), fiches produits, sites Internet de firmes, catalogue e-phy⁴, interviews réalisées courant 2014 avec des industriels et scientifiques.

2. Réseau Mixte Technologique rassemblant scientifiques et expérimentateurs autour de la stimulation de défense des plantes. Voir : <http://www.elicitra.org/>

3. European Biostimulants Industry Council. Voir : <http://www.biostimulants.eu/>

4. Catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages des matières fertilisantes et des supports de culture homologués en France, consultable à l'adresse suivante : <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>

Encadré 1 - Éléments de définition (1)

Substance : « Les éléments chimiques et leurs composés tels qu'ils se présentent à l'état naturel ou tels qu'ils sont produits par l'industrie, y compris toute impureté résultant inévitablement du procédé de fabrication » (Règlement (CE) 1107/2009).

Substance active : « Substances, y compris les micro-organismes, exerçant une action générale ou spécifique sur les organismes nuisibles ou sur les végétaux, parties de végétaux ou produits végétaux » (Règlement RCE 1107/2009).

Produit formulé ou préparation : « Les mélanges ou les solutions composés de deux ou plusieurs substances destinés à être utilisés comme produits phytopharmaceutiques ou adjuvants » (Règlement RCE 1107/2009). Cette définition sera également ici appliquée

pour les produits non phytopharmaceutiques. Les produits sont toujours considérés dans la forme dans laquelle ils sont livrés à l'utilisateur.

Formulant : « Substance ou préparation dépourvue d'activité biologique propre, incluse dans une préparation phytopharmaceutique ou biocide lors de la formulation afin de lui conférer les propriétés nécessaires à sa mise en œuvre » (CEB-AFPP, 2011).

Substance xénobiotique : « Un xénobiotique est un produit chimique ou un matériau qui ne se trouve pas dans la nature et qui n'est pas normalement considéré comme un élément constitutif d'un système biologique particulier » (définition de Rand et Petrocelli (1985) traduite dans l'ouvrage d'écotoxicologie de Forbes et Forbes, 1997).

Dans le tableau 2 (cf. annexes en pages 26), les caractéristiques de certaines substances sont précisées en utilisant les notations B (pour biocide), A (pour antagoniste), M (pour mixte) et PPP (pour produits de protection des plantes) :

- certaines substances SDP ont aussi un mode d'action *biocide* (B, produit détruisant les bioagresseurs) ou *antagoniste* (A, micro-organisme compétiteur pour l'espace ou les nutriments des agents pathogènes). Pour rester en accord avec la définition des SDP, le mode d'action majoritaire de ces substances actives doit être la stimulation des défenses contre les stress biotiques. Il est toutefois difficile de connaître la part exacte de résistance provenant de l'action SDP.
- certaines substances actives peuvent être considérées à la fois comme SDP et comme biostimulant, puisqu'il a été montré que ces substances provoquent une stimulation de la croissance et/ou une amélioration de la nutrition et/ou une résistance contre des stress abiotiques et une résistance contre des stress biotiques. Ces substances peuvent donc être considérées comme *mixtes* (M)⁵.

Ce tableau met en lumière la grande diversité de substances actives, commercialisées ou en cours de développement et présentant un effet dit « de stimulation ». Cette diversité s'explique par :

- l'intérêt fort des industriels dans les vingt dernières années, notamment des Petites et Moyennes Entreprises (PME), qui ont financé des projets de recherche afin de découvrir et tester des molécules nouvelles.
- l'intérêt des scientifiques pour l'étude de ces substances permettant d'avoir de meilleures connaissances fondamentales sur la nutrition des plantes ou sur les interactions entre la plante et les bioagresseurs.

5. Pour cette raison, elles sont listées deux fois dans le tableau même si leur mise sur le marché se fait le plus souvent en tant que MFSC (matières fertilisantes et supports de culture) avec des revendications liées aux biostimulants, à l'exception de *Trichoderma harzianum* qui est la substance active de deux produits homologués PPP (anciennement stimulateur de vitalité, actuellement SDN dans le catalogue e-phy).

La faible proportion de produits de type SDP commercialisés en France en comparaison du nombre de substances étudiées en laboratoire s'explique notamment par les décalages entre efficacité au laboratoire et au champ (cf. *infra*) et par la complexité de la procédure d'homologation en tant que produits phytopharmaceutiques. Du côté des biostimulants, cette même distinction n'a pas pu être réalisée, en raison du nombre restreint de recherches effectuées en laboratoire. La liste fournie dans la dernière colonne du tableau regroupe donc des biostimulants commercialisés en France et/ou potentiellement commercialisables. Un recensement non exhaustif permet d'estimer le nombre de produits biostimulants sur le marché français à plus de 300 à fin 2014.

3. Principales revendications agronomiques

Le tableau 3 (cf. annexes en page 28) recense, en distinguant sept catégories, les revendications agronomiques mises en avant lors de la commercialisation des produits de stimulation. Au-delà des gains économiques et environnementaux revendiqués par les deux catégories de produits, les biostimulants et les SDP mettent en avant des allégations spécifiques :

- résistance aux stress biotiques pour les SDP ;
- résistance aux stress abiotiques et autres revendications pour les biostimulants.

Sur la base d'une analyse de fiches produits, de la littérature scientifique et de nos interviews, des exemples d'effets revendiqués sont donnés pour chaque catégorie. Il s'agit ici de revendications possibles qui ne sont bien entendu pas utilisées pour tous les produits.

4. Modes d'action

Cette section donne un aperçu global et non exhaustif des modes d'action connus pour les produits de stimulation et aboutissant aux effets (revendications) présentés précédemment. Le *mode d'action* peut être défini comme le « mécanisme qui permet d'expliquer l'effet d'un produit [...] ». On peut distinguer un mode d'action biologique décrivant des phénomènes physiologiques, histologiques ou cellulaires ; et un mode d'action biochimique qui décrit des phénomènes chimiques ou enzymatiques » (CEB-AFPP, 2011), et définir *l'effet* comme le résultat ou conséquence (visible) des modes d'action. Une *revendication* fait référence à un ou plusieurs effet(s) mis en avant par le metteur en marché afin de catégoriser le produit. Enfin, la *fonction* est le rôle ou activité d'une substance ou d'un micro-organisme dans un ensemble de mécanismes engendrant un effet.

4.1. Modes d'action des SDP

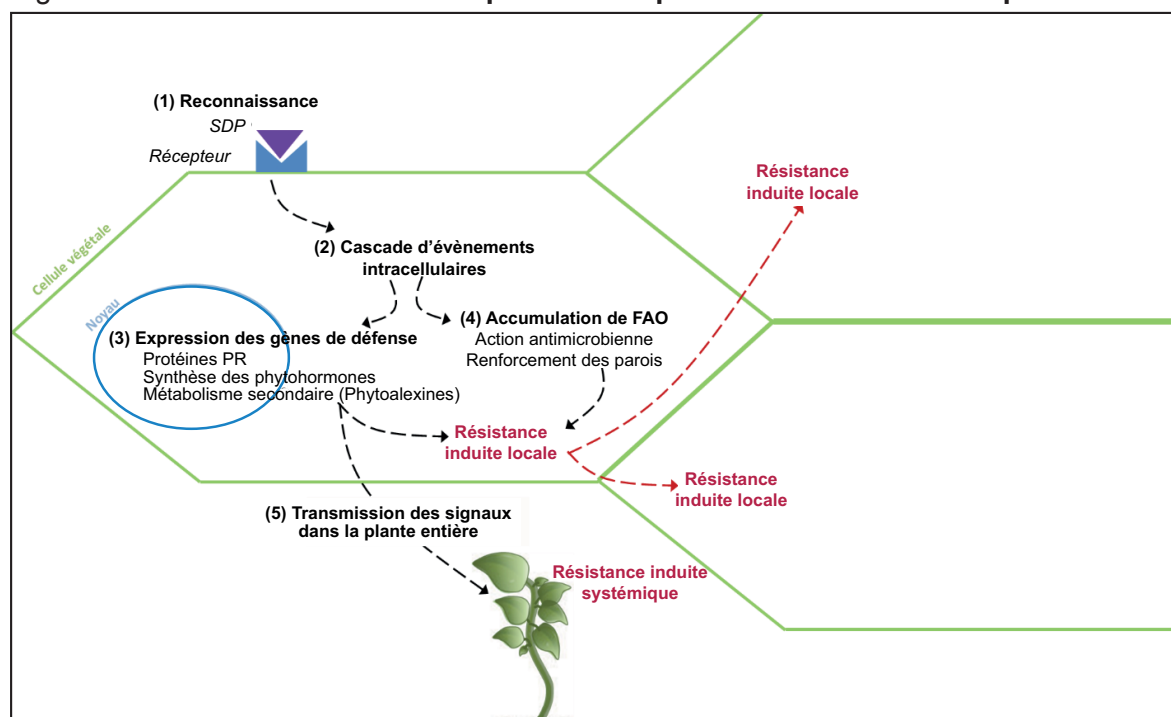
Les substances SDP strictes n'ont pas une action biocide mais agissent à travers la mise en place de réactions de défense non spécifiques face à un stress biotique. Cette *résistance induite* apparaît à travers l'activation directe des mécanismes de défense de la

plante et donne lieu à une réponse rapide (de quelques secondes à quelques heures selon le type de réponse considéré). Dans certain cas, l'induction peut avoir comme conséquence une activation ultérieure plus rapide et plus intense des mécanismes de défense, c'est ce qu'on appelle la *potentialisation* (ou *priming*).

Schématiquement, on peut distinguer les étapes suivantes dans la mise en place de la réponse de défense :

- 1) **reconnaissance** : le récepteur reconnaît un SDP.
- 2) **cascade d'évènements intracellulaires** : l'interaction récepteur/SDP active des processus cellulaires (dépolérisation membranaire, entrée importante d'ions Ca^{2+} dans la cellule, activation de protéines kinases pour la transmission du signal à l'intérieur de la cellule) menant à la résistance induite.
- 3) **expression des gènes de défense** : les kinases activent des facteurs de transcription spécifiques des gènes de défense, ce qui permet la synthèse des molécules de défense (protéines, phytohormones, métabolites secondaires, etc.).
- 4) **accumulation de Formes Actives de l'Oxygène (FAO)**, telles que le peroxyde d'hydrogène et l'oxyde nitrique. Ces molécules ont des actions antimicrobiennes directes et sont aussi impliquées dans le renforcement des parois cellulaires et dans la réaction d'hypersensibilité (voir paragraphe suivant).
Les évènements 3) et 4) permettent de déclencher, dans la cellule initiale et dans les cellules adjacentes, les voies de signalisation intracellulaires pour la mise en place de la **résistance induite**.
- 5) **transmission des signaux dans la plante entière** : le transport de certaines molécules mobiles dans les parties distantes de la plante permet la mise en place de la **résistance induite systémique**.

Figure 1 - Évènements de mise en place des réponses de défense de la plante



Source : auteurs, rapport final, page 50

La mise en place de la défense de la plante se fait au niveau local (dans la cellule) ou systémique (dans la plante entière). Les mécanismes de résistances aux agents pathogènes sont variés et vont dépendre de la nature de l'éliciteur :

- la **réaction d'hypersensibilité** est une mort programmée de la cellule. Il y a auto-destruction de la cellule attaquée et des cellules voisines. Cette réponse très rapide peut se mettre en place pour confiner le micro-organisme pathogène sur son site d'infection et ainsi limiter sa propagation (Van Breusegem *et al.*, 2001; Van Breusegem et Dat, 2006).
- le **renforcement de la paroi cellulaire** constitue une barrière physique face à l'entrée des micro-organismes pathogènes. Il s'agit notamment de l'épaississement de la paroi par apposition de certaines substances (callose, silice, composés phénoliques, subérine), de manière rapide et localisée ou par dépôt de lignine (composé très résistant aux enzymes de dégradation) le long de la paroi (Garcia-Brugger *et al.*, 2006 ; Senthil-Kumar et Mysore, 2013).
- la **synthèse de métabolites secondaires** est induite par l'activation de certains facteurs de transcription. Les phytoalexines sont des composés antimicrobiens de faible poids moléculaire synthétisés *de novo* en réponse à une attaque par un bioagresseur. Ces molécules ont un potentiel antimicrobien à faibles doses et s'accumulent au niveau des sites d'infection après induction des réponses de défense (Ahuja *et al.*, 2012).
- la **synthèse des protéines PR** (*Pathogenesis-Related*) est induite après la reconnaissance d'un éliciteur. Les protéines PR sont largement présentes dans le règne végétal et ont en commun d'être résistantes aux protéases endogènes et exogènes. Elles s'accumulent fortement au niveau des tissus infectés, mais également de façon systémique.
- la mise en place d'une **résistance systémique SA-dépendante** fait suite à l'induction de la réponse de défense au niveau local. Ce phénomène est la propagation d'un signal de défense dans la plante entière (Ross, 1961). L'induction en est caractérisée par une augmentation locale et systémique d'acide salicylique (SA) et par l'expression de certaines protéines PR. La mise en place de cette résistance systémique requiert la production de SA au niveau local (Van Breusegem *et al.*, 2001 ; Terres d'innovation, 2009), mais l'éthylène et l'acide jasmonique (JA) étant des molécules systémiques, elles jouent aussi un rôle dans la propagation du signal (Terres d'innovation, 2009).
- un phénomène similaire est la **résistance systémique SA-indépendante régulée par JA et l'éthylène** (Pajot et Regnault-Roger, 2008 ; Terres d'innovation, 2009). Elle est en général activée par des rhizobactéries non pathogènes nommées PGPR (PGPR pour *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*), mais aussi par des insectes et des bactéries nécrotrophes (Schillmiller et Howe, 2005 ; Pieterse *et al.*, 2006).

4.2. Modes d'action des biostimulants

Les substances actives des produits biostimulants vont avoir une action soit sur la plante soit sur le sol. Il est important de noter que les biostimulants sont généralement des produits complexes contenant une multitude de substances actives. L'effet observé sur la plante sera donc le résultat d'un ensemble d'actions réalisées par un ensemble de substances actives qu'il est difficile de décrire séparément. Néanmoins, il est possible de présenter le mode d'action global de chacun des principaux types de biostimulants.

Micro-organismes composant les biostimulants

Les micro-organismes utilisés en tant que biostimulants sont appliqués sur les semences, les feuilles ou le sol. L'effet souvent observé est la capacité d'améliorer la nutrition des plantes. Par conséquent, ces micro-organismes sont utilisés en complément de la fertilisation « classique », le plus fréquemment pour en réduire l'utilisation par amélioration de l'efficacité (Calvo *et al.*, 2014).

Les micro-organismes utilisés comme biostimulants sont des bactéries ou champignons vivants, parmi lesquels on compte les PGPR et PGPF. Il faut garder à l'esprit que certains micro-organismes ont aussi un effet bénéfique sur la résistance aux stress biotiques.

Exemples d'action directe sur la nutrition

- Des bactéries fixatrices d'azote, tels que *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* peuvent former avec les racines des plantes légumineuses des nodules dans lesquels elles convertissent l'azote atmosphérique N_2 en ammonium NH_4 pouvant être utilisé par ces plantes comme source d'azote. Un apport de bactéries fixatrices d'azote dans les sols peut permettre d'améliorer la nutrition, et donc la croissance des plantes, en particulier dans des milieux carencés.
- La fixation de l'azote peut aussi être asymbiotique. Plusieurs espèces bactériennes, telles qu'*Azospirillum* sp. et *Azotobacter* sp., sont des bactéries libres fixatrices d'azote. Sans former de nodules, elles sont toutefois associées aux racines et permettent une meilleure nutrition des plantes. L'augmentation des rendements observés dans les cas d'apport d'*Azospirillum* s'accompagne principalement d'un meilleur développement racinaire permettant une augmentation de l'assimilation d'eau et de nutriments.
- Les autres nutriments présents dans le sol peuvent aussi être mieux assimilés par les plantes en cas d'apport de certains micro-organismes. Certaines bactéries sont par exemple capables de solubiliser le phosphore (P) présent dans les sols. Ces bactéries appartenant à différentes espèces, telles que *Pseudomonas* sp. ou *Bacillus* sp., synthétisent des enzymes spécialisées dans la solubilisation du phosphate organique ou inorganique. D'autres bactéries appartenant au genre *Bacillus* sont spécialisées dans la solubilisation du potassium (K) à partir de minéraux. Les ions fer libres peuvent aussi être séquestrés par des chélateurs particuliers nommés « sidérophores » produits par certaines bactéries comme les *Pseudomonas* sp. et ainsi être plus disponibles pour les plantes. Les autres macro- et micro-nutriments peuvent aussi être mieux assimilés par les plantes lors de la présence des micro-organismes bénéfiques, mais tous les modes d'action connus ne peuvent être listés ici.
- Des champignons sont également utilisés comme biostimulants. En effet, les champignons mycorhiziens (ex : *Glomus* sp.) peuvent être apportés aux cultures pour stimuler la nutrition et le développement racinaire. Les filaments mycorhiziens sont des associations qui existent dans tous les écosystèmes naturels entre la plante et un champignon. Les filaments externes du mycélium se combinent aux racines des plantes et constituent ainsi un véritable prolongement du système racinaire qui va explorer le sol dans la périphérie de la racine et permettre une meilleure absorption des éléments nutritifs et de l'eau. Des échanges bénéfiques pour les deux parties se créent entre la plante et le mycélium.

Exemples de stimulation de la croissance

- Par ailleurs, certaines bactéries sécrètent des substances stimulant directement la croissance des plantes, comme des phytohormones (auxines, gibbérellines, cytokinines, éthylène) ou des molécules volatiles (2,3-butanediol, acétoïne, etc.). Les voies de signalisation ainsi stimulées par ces molécules exogènes conduisent à une stimulation de la croissance (racinaire ou végétative), à une augmentation de la teneur en chlorophylle, voire à une meilleure résistance aux stress abiotiques.

Substances humiques ou assimilées composant les biostimulants

Les substances humiques (acides humiques, acides fulviques, humines) sont des produits de décomposition des sols et sont considérées comme le composant majeur de la matière organique des sols (Calvo *et al.*, 2014).

Le mode d'action des substances humiques est complexe et encore peu connu. Une partie des molécules composant les substances humiques peut être assimilée par les plantes et ainsi agir directement sur les voies métaboliques (Nardi *et al.*, 2002). Les fractions à faible poids moléculaire (acide fulvique) et celles à fort poids moléculaire (acide humique) semblent tout de même agir différemment sur la plante (Trevisan *et al.*, 2010 ; Calvo *et al.*, 2014). De plus, toutes les substances humiques étant des mélanges complexes de différentes molécules, il est difficile de les caractériser et de les comparer.

Exemples d'action sur la nutrition des plantes

- La manière dont les substances humiques favorisent l'assimilation des ions (Na^+ , Ba^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , etc.) présents dans le sol est assez variable, et dépend de leur concentration dans le sol et du pH, mais aussi de l'ion considéré. Un exemple de mode d'action partiellement élucidé est la stimulation de l'expression des transporteurs d'ions dans les racines, même si le mécanisme physiologique impliqué n'est pas encore bien compris. Un autre mode d'action est la formation de complexes avec les ions présents sous forme libre dans les sols, les rendant ainsi plus disponibles pour les plantes.

Exemples de stimulation de la croissance et de la photosynthèse

- Certaines substances humiques ont aussi un effet direct sur les voies métaboliques primaires, en particulier ces substances permettent dans certains cas d'améliorer la respiration ou la photosynthèse des cellules végétales. Les substances humiques assimilées par les plantes semblent agir sur l'expression des enzymes impliquées dans ces mécanismes.
- Des substances hormonomimétiques présentes dans les substances humiques agissent directement sur la croissance et le développement des plantes, en particulier sur le développement racinaire.

Extraits bruts d'algues composant les biostimulants

Plusieurs procédés de fabrication existent pour produire des liquides concentrés (extraits bruts) à partir d'une grande diversité d'algues, majoritairement des algues brunes : *Laminaria sp.*, *Ascophyllum sp.*, *Ecklonia sp.*, etc. Les extraits bruts d'algues incluent une

multitude de composés (hormones, acides aminés, microéléments bénéfiques non essentiels tels que le silicium ou le sélénium, sucres, etc.), ce qui implique un ensemble complexe de modes d'action pouvant expliquer les effets observés.

Exemples d'action sur la nutrition et/ou le système racinaire

- Les extraits d'algues permettent d'améliorer l'assimilation des éléments nutritifs. En particulier, ils permettent à la plante de mieux tolérer des carences nutritives en azote en favorisant l'expression et/ou l'activité de la nitrate réductase grâce à certains composés (mannitol) (Durand *et al.*, 2003 ; Phytoma, 2005). L'expression de phosphatases racinaires impliquées dans l'absorption du phosphate peut aussi être stimulée par certains extraits d'algues (Klarzynski *et al.*, 2006).
- Certains composés présents dans les extraits d'algues (polysaccharides ; colloïdes ; acides aminés ; mannitol) peuvent aussi agir comme chélatants des nutriments minéraux présents dans les sols (Khan *et al.*, 2009 ; Calvo *et al.*, 2014).
- Enfin, les extraits d'algues agissent sur les caractéristiques physiques et biologiques des sols grâce à leur richesse en polyuronides, tels que les alginates et les fucoïdanes, qui maintiennent dans les sols une humidité et une aération nécessaires à la mise en place du système racinaire et favorisant la croissance de bactéries bénéfiques à la croissance des plantes (Khan *et al.*, 2009).

Exemples d'action sur la stimulation de la croissance et de la photosynthèse

- Les extraits bruts d'algues ont un effet positif direct sur la croissance et le développement des plantes (racines, tiges, feuilles et/ou fleurs). Cet effet est principalement dû aux hormones exogènes (cytokinines, auxines, gibbérellines) présentes dans les extraits (Faessel et Morot-Gaudry, 2009 ; Khan *et al.*, 2009).
- Certains composés présents dans les extraits d'algues (polysaccharides, polyamines) agissent sur la synthèse et l'activité des hormones endogènes (Faessel et Morot-Gaudry, 2009).
- La dégradation des chlorophylles est inhibée par certains composés, comme la glycine bêtaïne, pour favoriser une meilleure photosynthèse (Khan *et al.*, 2009).

Exemples d'amélioration de la résistance face aux stress abiotiques

- Les extraits d'algues permettent aussi d'améliorer la tolérance aux stress abiotiques provoquant des dérèglements osmotiques comme la sécheresse ou la salinité. C'est une conséquence de la stimulation des mécanismes antioxydants et de la présence d'osmo-régulateurs, comme la glycine bêtaïne, dans les extraits (Khan *et al.*, 2009).
- Les extraits d'algues contenant de l'acide abscissique peuvent aussi contribuer à la résistance au stress hydrique (voir ci-après).

Acides aminés et autres dérivés protéiques composant les biostimulants

L'effet observé des dérivés protéiques sur la stimulation de la croissance des plantes ne provient pas simplement de l'ajout d'une nouvelle source d'azote. Les biostimulants contenant des protéines ou acides aminés peuvent être séparés en deux catégories : les hydrolysats protéiques (mélange de protéines et acides aminés issus de la lyse d'organismes vivants : plantes, algues, animaux ou micro-organismes) et les acides aminés purifiés

(glycine bêtaïne, proline, acide glutamique, etc.) (Calvo *et al.*, 2014). La bêtaïne est un acide aminé non classique, originellement extrait de la betterave, mais qui peut aussi être purifié à partir de certains micro-organismes, de plusieurs espèces végétales ou d'algues. Chaque type de produit va donc avoir son propre mode d'action en fonction des acides aminés considérés et de leur concentration. La liste des modes d'action présentée ici est donc non exhaustive.

Exemples d'action sur la nutrition et/ou le système racinaire

- Les hydrolysats protéiques permettent une meilleure assimilation de l'azote, en favorisant notamment la synthèse par la plante de nitratre réductase et d'autres enzymes participant à la nutrition azotée.
- Certains acides aminés, comme la glycine et l'acide glutamique, sont des agents chélatants favorisant l'absorption des nutriments.
- L'application d'hydrolysats protéiques permet d'activer certains signaux moléculaires impliqués dans la formation de racines secondaires.

Exemples d'amélioration de la quantité et de la qualité des récoltes

- Les hydrolysats protéiques favorisent une meilleure qualité des récoltes en stimulant la synthèse de composés d'intérêt (vitamines, sucres, protéines, etc.) ou de composés améliorant la couleur des fruits (accumulation d'anthocyanines, polyphénols, caroténoïdes, etc.).
- Certains acides aminés spécifiques stimulent la germination des semences (acide aspartique, acide glutamique, phénylananine, etc.).
- Par ailleurs, certains acides aminés, comme la lysine et l'acide glutamique, favorisent la pollinisation. La proline favorise la fertilité du pollen.
- Enfin, les osmoprotectants comme la glycine bêtaïne améliorent la fermeté des fruits et limitent les microfissures des fruits en agissant sur les pressions osmotiques dans les cellules. Cette action améliore l'aspect des fruits et la tenue après récolte.

Exemples d'amélioration de la résistance face aux stress abiotiques

- Les hydrolysats protéiques, ainsi que certains acides aminés spécifiques, permettent une meilleure résistance face aux stress abiotiques. De manière générale, l'application d'hydrolysats protéiques peut augmenter les activités antioxydantes endogènes.
- Plusieurs modes d'action sont connus, en fonction du stress et du dérivé protéique, et impliquent la stimulation de certaines voies métaboliques. Par exemple, la glycine bêtaïne et la proline agissent en tant qu'osmoprotectant et stabilisent ainsi les membranes cellulaires en cas de salinité ou de températures non physiologiques. Ces deux osmolytes sont aussi capables de fixer les FAO et d'induire l'expression de gènes impliqués dans les réponses aux stress abiotiques.

Exemples d'amélioration de la photosynthèse

- La glycine et l'acide glutamique sont deux acides aminés précurseurs dans la synthèse de la chlorophylle. Leur apport exogène permet d'augmenter la photosynthèse. L'acide glutamique est aussi capable de favoriser l'ouverture des stomates ce qui permet d'activer la photosynthèse.

Autres exemples de substances composant les biostimulants

- L'**acide abscissique** (ABA) est une hormone dont l'application sur les plantes permet d'activer des réponses physiologiques face à des stress environnementaux tels que la sécheresse, le froid, et les stress osmotiques. L'ABA active la fermeture des stomates afin de limiter la perte d'eau (Finkelstein *et al.*, 2002). Sur vigne, le traitement à l'ABA quelques jours après véraison permet d'améliorer la qualité visuelle des grappes du raisin de table en accentuant la couleur recherchée pour la vente (Ferrara *et al.*, 2013).
- L'apport d'antioxydant comme le **tocophérol** (forme majoritaire de la vitamine E dans les chloroplastes) permet de limiter les effets néfastes des FAO (Munné-Bosch, 2005). Par exemple, le tocophérol séquestre et désactive les FAO formées par la photosynthèse et empêche la propagation des radicaux lipidiques en les piégeant dans les membranes des chloroplastes. L'apport de tocophérol exogène contribue à améliorer la tolérance de la plante face aux stress oxydatifs. Des études ont montré que d'autres antioxydants, comme le **glutathion**, favorisent aussi une meilleure réponse défensive face aux stress oxydatif (Munné-Bosch, 2005).
- Le **silicium** (Si) est un élément minéral non essentiel dont les bénéfices pour la croissance des plantes ont largement été démontrés lors de plusieurs études en pots et en champs (Guntzer *et al.*, 2011). En particulier, l'apport de Si améliore la tolérance à certains stress abiotiques (sécheresse, salinité, déficience nutritionnelle). En particulier, la présence de Si dans le sol favorise l'absorption de P lorsque la fertilisation phosphatée est un facteur limitant, et à l'inverse l'apparition de chlorose due à un excès de phosphore est limitée en présence de Si grâce à une diminution de l'absorption de P (Guntzer *et al.*, 2011). Aussi, l'absorption de K, N et Ca est améliorée lors d'un apport même faible de Si, ce qui favorise une meilleure croissance des cultures (Guntzer *et al.*, 2011). Enfin, en cas de déficit hydrique, l'apport de Si en application foliaire permet d'améliorer la teneur relative en eau dans les plantes en améliorant les échanges par les stomates et en limitant la perte d'eau par transpiration. Par ailleurs, la silice améliore l'activité antioxydante des enzymes et stabilise les structures cellulaires (Guntzer *et al.*, 2011).
- Des exemples de modes d'action plus originaux et spécifiques à un usage donné proviennent de la littérature non scientifique (fiches produits). Des produits contenant en mélange des **vitamines**, des **antioxydants**, et/ou des **osmorégulateurs**, avec éventuellement d'autres composants, possèdent une action combinée de stimulation de croissance et de protection contre les stress abiotiques, et permettent en particulier d'améliorer la croissance dans les phases précoces de développement (effet starter) (Pilatus®, Osiryl®). Cette action combinée peut aussi avoir un effet bénéfique sur la nouaison des arbres fruitiers afin d'améliorer la quantité des fruits récoltés (Folwin®, Antys®). Un autre exemple est l'application d'**extraits spécifiques de levures œnologiques** au moment de la véraison (début d'accumulation des sucres dans les raisins) afin d'améliorer les notes de dégustations grâce à une action sur les phénols (Lalvigne®).

5. L'efficacité des produits de stimulation

5.1. SDP

Concernant l'efficacité des SDP, on constate de manière récurrente un défaut de corrélation entre les résultats prometteurs issus d'expérimentations en conditions contrôlées et ceux plus aléatoires en plein champ (Blanchard et Limache, 2005 ; Beckers et Conrath, 2007 ; Walters, 2009 ; Walters *et al.*, 2013). Il existe aussi souvent un manque de reproductibilité entre les expérimentations (RMT Elicitra, 2012). Ce constat a suscité une grande controverse sur les substances « alternatives ». Certains utilisateurs se sont sentis trompés face à des produits peu ou pas efficaces, même si ces produits possédaient une autorisation de mise sur le marché par homologation (dossier contenant des essais démontrant l'efficacité).

Pour autant, certains produits de type SDP ont réellement démontré une efficacité même en plein champ lors d'essais réalisés en conditions réelles d'utilisation. Il est donc préférable de ne pas généraliser les problèmes d'efficacité de ces substances. Plusieurs phénomènes détaillés ci-après permettent d'expliquer, ou du moins d'émettre des hypothèses, quant à la différence parfois identifiée entre l'effet observé en laboratoire et l'efficacité au champ (cf. section sur les « facteurs influençant l'efficacité » ci-après).

5.2. Biostimulants

En ce qui concerne les produits de type biostimulants, la controverse est moins marquée mais tout de même existante. En effet, bien qu'une grande proportion des produits ait pu démontrer une réelle efficacité en champ, les biostimulants ont tout de même longtemps été associés aux « poudres de perlimpinpin ». Ceci est probablement dû au fait qu'il existe un décalage réel entre les produits homologués, pour lesquels l'efficacité a été démontrée par des essais, et les produits mis sur le marché sans homologation. Toutefois, il existe une nuance importante par rapport aux produits de type SDP qui peuvent être utilisés en remplacement d'un produit phytosanitaire classique. En effet, les biostimulants, eux, ne peuvent pas se substituer aux matières fertilisantes « classiques » puisqu'ils n'apportent pas d'éléments nutritifs. Les industriels préconisent une utilisation en complément aux produits fertilisants conventionnels afin d'améliorer l'efficacité de ces derniers. Les biostimulants sont d'ailleurs en majorité associés aux MFSC « classiques » (engrais, amendements, supports de culture) dans les produits formulés. Les buts qui peuvent être recherchés sont d'augmenter le rendement, la qualité des cultures ou la résistance aux stress abiotiques. Le coût raisonnable de ces substances, une augmentation du rendement de 10 % ou l'amélioration de la vigueur des plantes face aux stress abiotiques peuvent suffire à satisfaire l'utilisateur.

Néanmoins, les produits biostimulants ont aussi une efficacité qui peut varier en fonction de certains facteurs.

5.3. Les facteurs influençant l'efficacité

Type de culture et variétés

L'induction d'une résistance, la stimulation de la croissance ou d'autres actions de stimulation mobilisent des processus physiologiques propres à la plante et se trouvent donc

dépendants du génotype, qui provient à la fois de l'espèce végétale considérée et des différentes variétés cultivées. La génétique de la plante peut en effet avoir un impact sur la capacité de reconnaissance d'une substance élicitrice (interaction protéine/protéine et de manière générale toute interaction récepteur/éliciteur), sur le potentiel de réactivité de la plante, sur le temps nécessaire à l'induction, sur la durée de l'effet, sur l'interaction plante/micro-organisme, et donc sur le degré d'efficacité des substances actives présentes dans les produits de stimulation.

Certains produits auront donc un impact important sur une espèce cultivée et un impact moindre, voire absent, sur une autre espèce, même proche d'un point de vue génétique (RMT Elicitra, 2014 ; Calvo *et al.*, 2014). Aussi, la durée d'efficacité du produit peut varier entre deux espèces et le nombre d'applications sur la culture permettant de maintenir l'efficacité sur toute une saison peut varier.

L'existence d'une différence d'efficacité d'un même produit sur deux espèces végétales distinctes est déjà bien connue pour les produits « classiques », en particulier pour les PPP. Ce qui est nouveau pour les produits de stimulation c'est que pour une même espèce végétale, deux variétés différentes peuvent réagir de manière variable à la stimulation.

Substances de type SDP

Plusieurs travaux ont été menés pour montrer l'importance du génotype vis-à-vis de l'induction d'une résistance par des produits de type SDP (RMT Elicitra, 2012 ; Walters *et al.*, 2005). Dans le cas du soja par exemple, un même traitement avec un composé synthétique proche de l'acide salicylique (acide 2,6-dichloroisonicotinique, DCINA) vis-à-vis de la sclérotiniose (*Sclerotinia sclerotiorum*) est beaucoup plus efficace sur les variétés naturellement très sensibles que sur des variétés semi-résistantes (Dann *et al.*, 1998). Plus récemment, l'influence du cultivar de blé sur l'induction de la résistance par différents éliciteurs seuls ou en combinaison a été démontrée (Walters *et al.*, 2011).

Biostimulants

L'importance du facteur génétique a aussi été observée pour des produits de type biostimulants, comme par exemple des extraits d'algue appliqués sur différentes variétés de pruniers ou d'aubépine (Szabo et Hrotko, 2009), ou encore un mélange d'acides aminés n'entraînant pas d'amélioration du rendement sur épinards et endives mais ayant un effet positif pour une variété de carottes parmi celles testées (Calvo *et al.*, 2014).

Cas des micro-organismes (biostimulants ou SDP)

Enfin, l'espèce et la variété de la plante peuvent être des facteurs déterminants pour obtenir des effets bénéfiques avec des micro-organismes utilisés comme SDP ou biostimulant. L'environnement racinaire, créé par les exsudats racinaires et la microflore associée, sert de substrat pour l'activité de certains micro-organismes mais pas pour tous, ce qui peut engendrer une non-reproductibilité des essais (Calvo *et al.*, 2014). Aussi, toutes les plantes ne vont pas être réceptives à toutes les espèces de micro-organismes. Par exemple, la nodulation avec des bactéries de type *Rhizobium* ne peut se faire qu'avec des cultures de la famille des fabacées (appelées légumineuses dans le langage courant).

Conditions environnementales

Substances de type SDP

L'induction des mécanismes de défense par les produits de type SDP est influencée par différents paramètres environnementaux, en particulier les variations de température et de lumière (Walters *et al.*, 2005).

De récents travaux ont montré que chez *Arabidopsis thaliana* la réponse induite par le pathogène *Pseudomonas syringae* est dépendante de l'intensité lumineuse. La présence de lumière, même à faible intensité, est requise pour l'accumulation de SA et l'expression de la protéine PR1, impliquant que la nuit d'autres mécanismes cellulaires doivent entrer en jeu pour induire l'expression des gènes de défense. Dans cette étude, une meilleure croissance bactérienne est d'ailleurs observée la nuit. Par ailleurs, l'accumulation de JA et la production d'une phytoalexine (camalexine) était plus importante en absence de lumière. L'absence de lumière lors d'une infection primaire par la bactérie a également provoqué l'absence de réponse systémique (SAR) (Zeier *et al.*, 2004). Ces résultats sont intéressants et permettent de comprendre que certains facteurs environnementaux, comme la lumière, font varier les mécanismes cellulaires entrant dans la réponse induite. Cependant, il n'est pas possible de généraliser ce constat à l'ensemble des végétaux.

La fertilisation du sol peut aussi modifier l'efficacité observée. Ainsi, une bonne nutrition azotée conduit à une meilleure induction des réponses par l'ASM (Dietrich *et al.*, 2004). De même, le traitement à l'ASM peut avoir un coût physiologique en raison d'une forte utilisation des ressources de la plante pour la défense au détriment de la croissance (voir ci-dessous paragraphe « Coût physiologique de l'induction des défenses par les SDP »). Dans un tel cas, une bonne nutrition des cultures est essentielle pour permettre aux plantes stimulées de compenser ces effets négatifs (Dietrich *et al.*, 2005).

Biostimulants

Plusieurs études tendent à montrer que les variations des conditions environnementales ont une influence plus faible sur les produits de type biostimulants, en particulier lorsque leur revendication est la résistance aux stress abiotiques. Il a par exemple été montré pour une culture de carottes traitée sur plusieurs saisons avec un biostimulant à base d'acides aminés, que la réaction de la plante était majoritairement influencée par la variété utilisée et non par les conditions de température et d'hygrométrie (Grabowska *et al.*, 2012). Une autre étude conduite sur un biostimulant à base d'acides humiques appliqué sur plusieurs cultures maraichères (persil, poireau, céleri, tomate, oignon, laitue, basilic, radis et cresson) a permis de montrer une augmentation de la germination non influencée par les variations de température (Yildirim *et al.*, 2002). D'autres exemples encore ont été rapportés démontrant la capacité des biostimulants à agir sans être impactés par les conditions environnementales testées (Shekhar Sharma *et al.*, 2013 ; Calvo *et al.*, 2014), mais il faut toutefois nuancer le propos puisque les paramètres physico-chimiques dépendant des conditions climatiques influencent certainement la disponibilité de ces substances.

La fertilisation du sol modifie toutefois l'efficacité observée ; ainsi il semblerait que les biostimulants soient souvent plus efficaces lors d'une nutrition sub-optimale (Papenfus *et al.*, 2013 ; Calvo *et al.*, 2014).

Micro-organismes (biostimulants ou SDP)

Par ailleurs, les micro-organismes (*biostimulants ou SDP*) sont fortement affectés par les conditions environnementales, puisque la température, la salinité et les paramètres physico-chimiques du sol influent sur leur croissance, leur production de métabolites secondaires et enzymes, et leur capacité à créer une microflore bénéfique au niveau de la rhizosphère (Lugtenberg et Kamilova, 2009).

Coût physiologique de l'induction des défenses par les SDP

Un concept important est la notion de « coût physiologique » pour la plante. À la différence des défenses constitutives qui sont exprimées en permanence, les défenses impliquées dans la réponse induite le sont uniquement lors d'une attaque par un bioagresseur. L'hypothèse majeure expliquant cette stratégie suggère que les défenses induites sont bénéfiques pour la plante en présence de bioagresseurs mais qu'elles entraînent un coût pour le développement de la plante en l'absence de ceux-ci.

Dans certaines études, l'utilisation de SDP conduit à une réduction des symptômes de la maladie sans pour autant améliorer le rendement de la culture. Le coût physiologique de la résistance induite peut s'expliquer soit par l'auto-toxicité des mécanismes de défense induits, soit par le détournement de l'allocation des ressources (énergie, carbone, azote) au détriment de la croissance et du développement (Heil, 2001). Ces coûts physiologiques pourraient être plus marqués en cas de carences nutritives ou autres conditions de culture défavorables (Dietrich *et al.*, 2005). Des études doivent encore être menées pour mieux comprendre ces phénomènes.

Stades de développement de la plante

Au-delà de l'état physiologique de la plante (carence, stress biotique et abiotique), le stade de développement apparaît généralement comme un aspect essentiel à considérer pour déterminer le moment de l'application d'un produit de stimulation. Certains facteurs morphologiques dépendant de l'âge de la plante (épaisseur de la cuticule, présence de poils, etc.) peuvent avoir un effet sur la pénétration et l'absorption du produit. L'âge de la plante peut aussi influencer sur sa capacité à répondre à la stimulation.

SDP

Dans le cas des substances de type SDP, la variation de l'efficacité en fonction du stade de développement de la plante a été démontrée chez le pommier et la vigne dans le cadre du projet Defistim 2011-2014 (Steimetz *et al.*, 2012).

Biostimulants

Dans le cas de biostimulants par exemple, il n'est pas rare de voir des fiches d'application de produits indiquant les stades phénologiques BBCH⁶ exacts auxquels le produit doit être appliqué. En dehors de ces stades bien précis, le produit peut ne plus être efficace,

6. L'échelle BBCH (abréviation pour *Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt et Chemische Industrie*) utilise un système décimal (de 00 à 99) servant à la codification des stades phénologiques des mono- et dicotylédones. Elle est divisée en stades de développement principaux et secondaires. L'échelle générale est la base pour toutes les espèces. Les échelles individuelles sont élaborées à partir de celle-ci.

voire avoir un effet négatif sur la plante ou sur son rendement (Ferreira et Lourens, 2002 ; Khan *et al.*, 2009). Le fait de stimuler la croissance racinaire peut défavoriser la croissance végétative en changeant le ratio racines/tiges, et au-delà d'un certain stade de développement, ceci pourrait freiner la croissance des fruits ou graines.

Du côté du bioagresseur

Dans le cas d'une forte pression d'agents pathogènes ou ravageurs (en particulier lors de cultures en plein champ), l'efficacité de la protection d'un SDP diminue. Les SDP n'ont en général pas d'action biocide directe mais agissent uniquement sur les réponses de défense de la plante (AFPP, 2013). Le produit va aider la plante à se défendre jusqu'au point où son activité biologique ne peut plus rien contre la pression des bioagresseurs.

Par ailleurs, l'induction de la résistance peut nécessiter un intervalle de temps entre le moment où le traitement est appliqué et le moment où l'efficacité permettra une résistance contre le bioagresseur. En conditions contrôlées, il est facile de gérer l'introduction du bioagresseur. L'intégration de ces produits dans des programmes agricoles nécessite donc d'avoir une parfaite connaissance des agents pathogènes et des ravageurs, en particulier de savoir anticiper leur arrivée (RMT Elicitra, 2013).

Modalités d'application des produits

De manière générale, il est important que l'utilisateur respecte les doses d'apport conseillées par la firme. En effet, l'efficacité peut fortement varier selon la dose apportée. Le fait d'apporter une dose plus importante ne va d'ailleurs pas forcément améliorer l'efficacité du produit de stimulation. Pour certains biostimulants, comme les extraits d'algues par exemple, il a été montré qu'une dose trop forte pouvait avoir un effet phytotoxique, baisser les rendements ou encore inhiber l'activité microbienne des sols (Sivasangari Ramya *et al.*, 2011 ; Ferreira et Lourens, 2002 ; Chen *et al.*, 2002).

Par ailleurs, il est souvent plus aisé de bien appliquer le produit sur l'ensemble de la surface foliaire, lors d'essais en laboratoire, sur un faible nombre de plantes, par rapport à l'utilisation en plein champ. Cette inégalité d'application pourrait expliquer en partie les différences d'efficacité observées en plein champ. Il est donc important de considérer que la dose apportée réellement à chaque plante peut être plus hétérogène lorsqu'on passe au champ. Ces paramètres devraient être pris en compte lors de l'évaluation de l'efficacité d'un produit et lors de l'évaluation de la dose d'apport recommandée en conditions réelles.

Formulation et étiquetage des produits

Le manque d'efficacité d'un produit peut provenir d'un problème de biodisponibilité. La formulation joue donc un rôle majeur. Lors de nos interviews, plusieurs acteurs (scientifiques et industriels) ont insisté sur l'importance de la formulation pour les produits de stimulation.

La formulation commerciale des micro-organismes entrant dans la composition de produits SDP ou biostimulants est primordiale pour permettre la viabilité et l'efficacité des micro-organismes vivants après leur application. Dans ce cas, la date limite d'utilisation et les conditions de conservation doivent être impérativement indiquées sur l'étiquette et respectées par l'utilisateur pour garantir l'efficacité du produit.

6. Les risques liés aux produits de stimulation

L'utilisation de produits, que ce soit des produits phytopharmaceutiques ou des matières fertilisantes, présente de fait un risque pour l'environnement, l'utilisateur ou le consommateur. La mise en marché de ces produits utilisables en agriculture nécessite de justifier de leur innocuité, ou du moins de prouver que l'apport bénéfique est largement supérieur aux effets non intentionnels (voir encadré 2 pour une définition des principales notions).

Encadré 2 - Eléments de définition (2)

L'**innocuité** d'un produit est la recherche d'un niveau de risque acceptable à l'égard de l'Homme (utilisateur et consommateur) et de l'environnement. Par définition, l'idéal recherché est l'absence totale de risque. L'innocuité regroupe ainsi l'évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques.

La **toxicité** est « la capacité d'une substance à causer un effet néfaste à un système biologique tel que : baisse de la survie, de la croissance ou de la reproduction ; cancérogénicité, mutagénicité, tératogénicité ; autres effets préjudiciables par suite d'une perturbation du milieu (ex : perturbation endocrinienne, eutrophisation des eaux, etc.) » (ANSES, 2013).

La **toxicologie** consiste à étudier la toxicité d'un produit pour l'Homme, depuis les phases

de fabrication du produit jusqu'au consommateur final. Elle est en général évaluée sur des cultures cellulaires animales/humaines ou des animaux (rats, lapins, souris, etc.).

L'**écotoxicologie** « se préoccupe des effets toxiques des agents chimiques et physiques sur les organismes vivants, notamment les populations et les communautés au sein d'écosystèmes définis » (ANSES, 2013).

Le **risque** est la « probabilité d'occurrence de l'effet néfaste lié au danger considéré, dans un système biologique donné, en fonction de l'exposition » (ANSES, 2013).

L'**évaluation du risque (éco) toxicologique** consiste en une série de méthodes permettant d'estimer les probabilités et/ou les ordres de grandeur d'effets indésirables résultant de l'apport d'une substance. Dans le cas de la mise en marché de produits utilisables en agriculture, l'évaluation des risques permet de définir si un produit est néfaste ou non pour l'environnement et l'Homme. Le principe de précaution, qui est un élément important dans la démarche de mise en marché des produits utilisables en agriculture, peut alors s'appliquer.

En France, l'évaluation du risque des produits utilisés en agriculture est basée en général 1) sur la caractérisation du danger potentiel des matières premières et contaminants du produit fini, et 2) sur l'évaluation réelle par des expositions de plusieurs doses du produit vis-à-vis d'une série de bio-indicateurs (animaux ou végétaux). Des valeurs de référence toxicologiques et/ou écotoxicologiques sont établies par les autorités.

6.1. Produits classés, REACH et CLP

Certaines substances composant les produits de stimulation entrent dans le cadre de REACH (*Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals*) (règlement (CE) n° 1907/2006 modifié) et doivent faire l'objet de dépôt d'un dossier auprès de l'ECHA

(*European Chemicals Agency*). Ce règlement vise une meilleure connaissance des effets des substances chimiques sur la santé humaine et sur l'environnement pour une gestion efficace des risques liés à l'utilisation des produits.

Un produit est concerné par REACH au travers des substances qu'il contient. Certains produits de stimulation sont donc classés soit directement par la substance active classée (ex : certaines formes de silice), soit par la présence de co-formulants classés (ex : acidifiants, présence d'oligo-éléments, etc.).

En plus du règlement REACH, certaines substances sont soumises au règlement CLP (*Classification, Labelling, and Packaging*) qui a pour objectif d'assurer que les dangers que présentent les substances chimiques sont clairement communiqués aux travailleurs et aux consommateurs de l'Union européenne, grâce à la classification et à l'étiquetage des produits chimiques. Le CLP définit des critères et méthodes pour déterminer si un produit présente des dangers physiques, des dangers pour la santé humaine et/ou des dangers pour l'environnement. Si une substance est « classée », l'étiquette du produit contenant cette substance doit clairement informer l'utilisateur sur les phrases de risque⁷ correspondantes (ex : irritant pour la peau, toxique pour les organismes aquatiques, etc.).

6.2. Évaluation du risque des SDP

Innocuité de la substance

Les SDP possèdent des profils toxicologiques et écotoxicologiques variables, et l'évaluation de l'innocuité nécessite donc de se faire au cas par cas en fonction de la composition.

Certains SDP mis sur le marché en France ne sont pas classés par le RCE 1272/2008 (règlement sur la mise sur le marché des PPP), ce qui signifie que suite à l'évaluation des risques (éco) toxicologiques, aucune phrase de risque ne leur est associée. Il s'agit par exemple de Serenade® (*Bacillus subtilis*), de Stifenia® (extrait de fenugrec), et de Vacciplant® (laminarine).

D'autres SDP sont classés selon le RCE 1272/2008. On peut entre autres citer « (R36/R38 – classification CLP : H319/H315) irritant pour les yeux et la peau » et « (R51 - classification CLP : H411) Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme » pour Bion WG® (ASM – n° d'AMM 9600526), ainsi que « (R53 – classification CLP : H413) peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique » pour LBG-01F34 (phosphite de potassium – n° d'AMM 2100041).

Innocuité de la résistance induite par les SDP

Alors que l'évaluation des risques des substances est bien prise en compte pour les SDP avant la délivrance d'une autorisation pour la mise en marché, l'évaluation des risques liés à la résistance induite (leur mode d'action) n'est pas prise en compte. Par ailleurs, très peu d'études scientifiques ont jusqu'à présent été effectuées sur ce sujet.

7. Annotations sur les étiquettes des produits indiquant les risques encourus lors de leur utilisation.

Effets sur les interactions symbiotiques

La résistance induite peut entraîner des effets collatéraux sur les relations symbiotiques plantes/micro-organismes. En effet, il a été montré que la nodulation entre le soja et *Bradyrhizobium japonicum* est significativement inhibée par un traitement à l'ASM, très probablement par l'activation des mécanismes de défense qui utilisent des voies de signalisation intracellulaires similaires à celles permettant la symbiose (Faessel, 2008). Une autre étude a montré que la croissance de soja dans des solutions contenant des quantités croissantes de SA inhibe la formation des nodules (Lian *et al.*, 2000). De la même manière, la mycorhization entre le soja et *Glomus mosseae* est affectée par l'induction des mécanismes de défense par l'ASM (Faessel, 2008), tout comme l'interaction entre le tournesol et *Glomus mosseae* (Tosi et Zazzerini, 2000).

Ces effets non intentionnels peuvent causer des diminutions de la nutrition des cultures dépendantes des interactions symbiotiques. Une diminution de la teneur en azote a d'ailleurs été observée chez le soja après application d'ASM causant une perturbation de la nodulation (Faessel, 2008).

Effets sur la résistance aux insectes ravageurs

La résistance induite par les produits SDP est souvent dépendante de la voie de l'acide salicylique (SA), ce qui permet une résistance contre les micro-organismes pathogènes. Cependant, la résistance de la plante contre les insectes ravageurs dépend non pas de SA mais de l'acide jasmonique (JA). Plusieurs études ont montré que les voies SA et JA ne sont pas des voies indépendantes, mais forment plutôt un réseau complexe conduisant à de fortes interactions. De nombreux résultats suggèrent que ces deux voies de signalisation sont antagonistes, c'est-à-dire que l'une inhibe l'autre.

En induisant les défenses SA-dépendantes, on peut donc légitimement se demander si cela ne rend pas les plantes plus sensibles à d'autres bioagresseurs non ciblés. Deux études ont montré que l'induction de la voie SA réduit la résistance d'*Arabidopsis thaliana* et des tomates vis-à-vis des chenilles *Spodoptera exigua* (Cipollini *et al.*, 2004 ; Thaler, 1999).

Potentiel allergène lié à la résistance induite

Le potentiel allergène des protéines PR produites lors de l'induction de la résistance par un SDP, et présentes dans les fruits ou graines, n'a pas été étudié. Or, on sait que 42 % des 440 allergènes d'origine végétale appartiennent à la famille des protéines PR (Malandain et Lavaud, 2004). Par exemple, les protéines Hev b2 (bananes), Pers a1 (avocat), Bekt1 (bouleau), Api g1 (céleri), appartiennent à la famille des protéines PR et sont très allergènes (Hoffmann-Sommergruber, 2002).

Aucune étude reliant directement la résistance induite et la présence d'allergènes dans les aliments n'a été réalisée à ce jour. Néanmoins, les processus de défense de la plante induits par les SDP sont également induits par le pathogène dans une culture non traitée par un SDP. Il s'agirait donc de voir si l'accumulation d'allergènes peut être plus importante dans le cas d'une induction par traitement.

6. 3. Évaluation du risque des biostimulants

Les biostimulants sont régulièrement considérés comme des produits plus « naturels », moins nocifs pour l'Homme et l'environnement, et ce même s'ils sont de synthèse. Pour

autant, il est nécessaire de ne pas généraliser ce point de vue et la démonstration de l'innocuité d'un produit biostimulant doit être prise en considération avant toute mise en marché.

Les sources principales d'informations concernant la démonstration de l'innocuité des biostimulants sont les avis publiés par l'ANSES suite à des demandes d'homologation pour la mise en marché de biostimulants en France.

Biostimulants de type substance

On considère ici les biostimulants ne contenant aucun organisme vivant, mais uniquement des molécules ou complexes de molécules.

Beaucoup de produits biostimulants sont non classés et donc *a priori* à faible risque pour l'environnement et l'Homme. On peut par exemple citer Greenstim® (glycine bêtaïne – n° d'AMM 2100041) et Pheoflore (extrait d'algues et de vinasse – n° d'AMM Pheoflore). Il s'agit de conclusions provenant des modèles d'évaluation de l'innocuité utilisés à l'heure actuelle.

Toutefois, certains produits biostimulants sont classés, en raison de la présence dans leur composition de substances actives entrant dans le cadre de REACH.

L'origine des biostimulants peut parfois susciter des questionnements au sujet de leur innocuité : les lieux d'extraction peuvent subir des pollutions ou les processus de fabrication peuvent engendrer la présence de résidus nocifs. Par exemple, une pollution accidentelle des sites de ramassage des algues peut provoquer la présence d'HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), molécules toxiques qui peuvent éventuellement se retrouver dans le produit fini. La présence de polluants, tels que des contaminants cationiques (ETM, HAP, radionucléides atmosphériques, etc.), peut aussi être supposée dans les substances humiques puisque ce sont d'excellents complexants. L'utilisation de résidus animaux tels que les résidus de cuir pour la production d'acides aminés soulève également la question de la présence de chrome utilisé lors du tannage.

Néanmoins, chaque produit étant composé de substances de natures et d'origines (y compris géographiques) variables, il est indispensable de considérer les biostimulants au cas par cas en ce qui concerne l'innocuité.

6.4. Évaluation du risque des produits de stimulation (SDP et biostimulant) de type micro-organismes

Les informations concernant les micro-organismes utilisés comme substance active concernent à la fois les SDP et les biostimulants. Nous avons choisi de les traiter ensemble, même si les critères d'évaluation de risque sont différents entre une demande d'homologation d'un produit PPP (pour les revendications SDP) et d'un produit MFSC (pour les revendications biostimulants).

Risque toxicologique

Les produits de stimulation de type micro-organismes ne présentent en règle générale que peu de risques pour l'Homme. Ce sont couramment des bactéries ou champignons présents naturellement dans les sols ou sur les plantes. Néanmoins, en raison des effets potentiellement sensibilisants des micro-organismes, les avis pour l'homologation permettant la mise en marché contenant des micro-organismes vivants imposent à l'industriel d'apposer

sur l'étiquette la mention suivante : « les micro-organismes peuvent provoquer des réactions de sensibilisation ».

Par ailleurs, quelques très rares cas d'infections par *Trichoderma harzianum* ont été rapportés chez des personnes immunodéprimées, mais la souche à l'origine de ces effets indésirables n'a pas été clairement identifiée (avis d'autorisation de mise sur le marché Trianium-P (ANSES, 2009)). De même, l'utilisation sous serre de préparations à base de *Trichoderma harzianum* a été reliée à des toux et des difficultés respiratoires chez les travailleurs, donc à des risques potentiels.

Risque écotoxicologique

Les micro-organismes représentent un groupe très hétérogène (différentes espèces de bactéries et champignons), et l'évaluation devrait donc se faire au cas par cas. Toutefois, la plupart des souches microbiennes sont souvent présentes dans les sols ou isolées des plantes, donc ont potentiellement peu d'effets écotoxicologiques comparés aux substances conventionnelles. Néanmoins, le côté « naturel » souvent mis en avant n'est pas forcément synonyme « d'inoffensif » et les tests d'écotoxicité requis par la réglementation sont nécessaires. Le fait d'apporter une importante quantité d'une seule souche de micro-organisme peut perturber un écosystème. Il est donc essentiel de réaliser des tests d'innocuité. En effet, très peu de données existent dans la littérature scientifique concernant le risque potentiel lié à l'introduction de ces micro-organismes dans un environnement agricole.

Les risques liés à l'utilisation de ces produits vis-à-vis de la microflore (bactéries et champignons) et de la mésofaune (nématodes) du sol sont généralement considérés comme négligeables, en particulier lorsqu'on les compare à l'introduction de matières fertilisantes classiques, où des changements dans la composition et la biomasse des micro-organismes du sol sont souvent observés. Néanmoins, si l'utilisation de micro-organismes provoque effectivement des impacts négatifs sur des micro-organismes d'intérêt agronomique présents dans le sol, des conséquences agronomiques et environnementales importantes pourront être observées.

Métabolites microbiens

Les experts qui évaluent les produits contenant des micro-organismes se penchent souvent sur la toxicité des nombreux métabolites produits par ces micro-organismes : antibiotiques, mycotoxines, etc. Pour exemples, la souche M4 de *Bacillus amyloliquefaciens* produit de la fengycine (biosurfactant), la souche T22 de *Trichoderma harzianum* produit *in vitro* une anthraquinone (HAP), mais aucune information n'est disponible sur la production de ce métabolite *in vivo* (ANSES, 2009). La production de ces métabolites est très souvent souche-spécifique, ce qui empêche la transposition d'informations bibliographiques à la souche évaluée.

Concernant le devenir dans le sol (dégradation, stabilité) des métabolites produits par les micro-organismes, très peu d'études bibliographiques portent sur le sujet et les études de dégradation donnent des résultats différents en fonction du type de sol, des conditions d'incubation et du métabolite considéré. Les paramètres physico-chimiques du sol peuvent fortement influencer la dégradation de ces métabolites. De manière générale, ces métabolites sont biodégradables et sont produits en faible quantité par les micro-organismes. Toutefois, il faut souligner que la durée de dégradation dans le sol, pour une même molécule, est variable d'un sol à l'autre. Par ailleurs, la toxicité dépend de la dose d'inoculum ainsi que de la concentration à laquelle le potentiel effet délétère est observé.

Conclusion : perspectives pour l'agro-écologique

Une synthèse des principaux atouts et limites des produits de stimulation est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1 - Synthèse des atouts et limites des produits de stimulation

SDP	Biostimulants
<p>Un large champ d'action</p> <ul style="list-style-type: none"> > La plupart des SDP induisent des réponses chez plusieurs espèces végétales. > Les mécanismes de défense induits par les SDP ne sont pas spécifiques à un agent pathogène donné et permettent ainsi de lutter contre un large spectre de bioagresseurs (bactéries, champignons, insectes etc.) de manière simultanée. > Ce large spectre d'action permet de lutter contre des maladies bactériennes et virales pour lesquelles peu ou pas de moyens de protection sont disponibles. <p>Une résistance qui peut se propager</p> <ul style="list-style-type: none"> > Le transport du signal de résistance peut dans certains cas (par exemple propagation de l'acide salicylique) se faire dans toute la plante ce qui a pour effet une protection de la plante entière (résistance induite systémique). > Dans certains cas, possibilité d'induction de résistance chez les plantes voisines <i>via</i> des molécules volatiles. <p>Un faible risque d'apparition de résistance chez les agents pathogènes et ravageurs</p> <ul style="list-style-type: none"> > Les SDP activent diverses voies de signalisation en parallèle dont les processus complexes impliquent un grand nombre de gènes, ce qui contribue à limiter le risque d'apparition de résistance chez les populations pathogènes. On doit toutefois préciser que l'on manque de recul et de connaissances sur les conséquences en termes d'apparition de résistances d'une réduction des doses de phytosanitaires « classiques » utilisées en association de SDP. <p>Une complémentarité avec d'autres stratégies de protection des plantes</p> <ul style="list-style-type: none"> > Les SDP, qui s'utilisent préférentiellement dans des programmes de traitement combinant d'autres produits phytosanitaires, permettent généralement d'espacer et/ou de retarder les traitements « classiques ». > Les SDP (stricts) n'ont pas d'action biocide directe, ils n'engendrent donc aucun effet délétère sur les auxiliaires des cultures, ce qui les rend compatibles avec les programmes de lutte biologique. <p>Une (éco) toxicité généralement réduite⁸</p> <ul style="list-style-type: none"> > Plusieurs SDP sur le marché ne sont associés à aucune phrase de risque > Un bon nombre de SDP sont des analogues ou des dérivés de molécules issues du vivant qui sont biodégradables et qui présentent un risque très limité (en l'état actuel des évaluations de dangers pour l'environnement et pour la santé des consommateurs). 	<p>Action <i>via</i> une régulation de l'activité biologique</p> <ul style="list-style-type: none"> > De par leur définition, les biostimulants peuvent agir sur plusieurs aspects bénéfiques pour la culture (action sur la nutrition et/ou le système racinaire, stimulation de la croissance et de la photosynthèse, amélioration de la résistance face aux stress abiotiques, amélioration de la quantité et de la qualité des productions). <p>Des gains possibles sur les aspects environnementaux et économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> > Les gains économiques ne sont pas négligeables pour l'utilisateur : diminution de la quantité d'engrais, augmentation des rendements et amélioration de la qualité des récoltes. > Les gains environnementaux s'inscrivent dans les mesures d'agro-écologie : diminution de la quantité d'engrais, meilleure gestion de l'azote, augmentation de la biodiversité des sols, etc. <p>Une (éco) toxicité généralement réduite</p> <ul style="list-style-type: none"> > Beaucoup de produits biostimulants de type « substance » (i.e. pas des micro-organismes) sont non classés et donc à faible risque pour l'environnement et l'Homme. > La plupart des souches microbiennes sont souvent présentes dans les sols ou isolées des plantes donc ont potentiellement peu d'effets (éco) toxicologiques. Toutefois, les effets d'un apport massif d'une souche donnée doivent être investigués. <p>Une économie basée sur le savoir et l'innovation</p> <ul style="list-style-type: none"> > Le secteur des biostimulants emploie du personnel à haute qualification. > Les industriels des biostimulants ont noué de nombreux partenariats avec des universités et instituts de recherche <p>Des substances actives à des doses très faibles</p> <ul style="list-style-type: none"> > Les flux de substances actives appliquées sont très faibles en comparaison à d'autres intrants (engrais, amendements, etc.).

8. On précise toutefois que des SDP sont classés selon le RCE 1272/2008, par exemple (R36/R38) « irritant pour les yeux et la peau » et « (R51) très toxique pour les organismes aquatiques » pour le Bion WG® (ASM).

Tableau 1 - Synthèse des atouts et limites des produits de stimulation (suite)

SDP	Biostimulants
<p>> En général, les SDP ne présentent pas de contrainte de Limite Maximale de Résidus (LMR) et de Délai Avant Récolte (DAR), d'où une meilleure flexibilité pour l'utilisateur.</p> <p>Une économie basée sur le savoir et l'innovation</p> <p>> Le secteur emploie du personnel à haute qualification pour la R&D, que ce soit dans la recherche publique ou dans les nombreux partenariats recherche/industriels.</p> <p>Une efficacité limitée en comparaison aux produits « classiques »</p> <p>> En règle générale, l'utilisation d'un SDP seul ne peut pas protéger une culture tout le long d'un cycle.</p> <p>> Le système de défense intrinsèque à la plante peut être dépassé par une pression d'agent pathogène ou de ravageur trop importante.</p> <p>> L'efficacité dépend de plusieurs facteurs, encore peu connus ou mal maîtrisés (type de culture et variétés, conditions environnementales, stade de développement de la plante, modalités d'application des produits, etc.). Il y a un manque de connaissances scientifiques sur l'intégration optimale des produits dans les itinéraires techniques.</p> <p>Une utilisation qui nécessite un suivi rigoureux de la culture</p> <p>> L'utilisation des SDP peut s'avérer plus contraignante que pour les produits « classiques ». Le mode d'action des SDP nécessite d'être très précis sur les périodes d'utilisation, puisqu'il est souvent nécessaire de faire l'apport en préventif de l'arrivée de l'agent pathogène ou du ravageur, mais il faut également que la plante soit à un stade physiologique réceptif.</p> <p>Ressources naturelles nécessaires pour la production de SDP ?</p> <p>> Dans une perspective de long terme, si le marché des SDP se développe très largement au niveau mondial, il faudra produire des quantités importantes de substances issues de la biomasse (extraits d'algues, de plantes, etc.) sans impacter les écosystèmes et les productions agricoles à vocation alimentaire. Le problème sera toutefois moins prégnant pour la production de micro-organismes.</p>	<p>Un complément mais pas une alternative aux MFSC « classiques »</p> <p>> Les biostimulants ne remplacent que rarement les fertilisants traditionnels. En eux-mêmes, ces produits n'apportent pas ou très peu d'éléments nutritifs à la plante.</p> <p>Une efficacité optimale dépendante de nombreux facteurs</p> <p>> L'efficacité dépend de plusieurs facteurs, encore peu connus ou mal maîtrisés (type de culture et variétés, conditions environnementales, stade de développement de la plante, modalités d'application des produits, etc.). Il y a un manque de connaissances scientifiques sur l'intégration optimale des produits dans les itinéraires techniques.</p> <p>Un patchwork réglementaire</p> <p>> La mise en marché de produits peu efficaces a pu être favorisée par l'absence d'une terminologie et de définitions uniques aux biostimulants, et par l'inadaptation de l'évaluation pour ces produits innovants. La prise en compte de ces éléments par les pouvoirs publics devraient changer la donne.</p> <p>Ressources naturelles nécessaires pour la production de Biostimulants ?</p> <p>> cf. point SDP</p>

Source : auteurs

Les produits de stimulation s'inscrivent dans des démarches d'innovation en lien notamment avec la réduction des intrants « conventionnels ». Le modèle « Efficience-Substitution et Reconception » (ESR) (Hill et MacRae, 1995) permet d'analyser dans quelle mesure l'utilisation de ces produits va affecter les pratiques en place au niveau d'une exploitation :

- efficacité : les changements au sein d'un système visent à réduire la consommation et le gaspillage de ressources rares et coûteuses. Les changements sont donc d'ampleur limitée.
- substitution : certains produits ou composants du système sont remplacés par d'autres. Les changements sont donc plus importants et plus complexes à mettre en œuvre que dans une approche « efficacité ».
- reconception : consiste à repenser l'intégralité du fonctionnement du système, afin de répondre aux nouvelles exigences qui lui sont adressées. Les changements sont beaucoup plus importants et plus longs à mettre en œuvre.

Les biostimulants participent actuellement plutôt de l'efficacité en améliorant l'efficacité des engrais ou en optimisant l'utilisation de l'eau. Les Stimulateurs de Défenses des Plantes permettent une substitution, généralement partielle, aux PPP « conventionnels ». Leur utilisation est souvent préconisée en combinaison, que ce soit dans le cadre d'un programme de traitement alternant application d'un SDP et d'un PPP « conventionnel » ou bien par l'application de spécialités commerciales dont la formulation associe directement un SDP et un PPP « conventionnel ». Cependant, l'utilisation de ces produits entraîne tout de même certains bouleversements, et notamment en protection des cultures, avec le passage d'une logique curative à une logique préventive.

À terme, les produits de stimulation pourraient être intégrés à des stratégies de reconception. Pour les insérer de manière optimale dans les systèmes de culture et faire progresser leur efficacité, il faudra travailler sur de nombreux facteurs agronomiques et bâtir de nouveaux itinéraires techniques en s'écartant si besoin des pratiques « conventionnelles » (penser conjointement le choix des variétés, associer à d'autres pratiques, etc.).

Annexes

Tableau 2 - Origine et nature des produits de stimulation

Légende : B : SDP à action Biocide ; M : substance Mixte à action SDP et biostimulant ; A : SDP à action Antagoniste ;
PPP : produit homologué en tant que PPP

Origine/nature	SDP commercialisés et homologués en France (Consultation liste e-phy octobre 2014)	SDP non commercialisés en France (encore au stade laboratoire ou commercialisés à l'étranger)	Biostimulants
Substances issues du vivant	Micro-organismes vivants		
	<ul style="list-style-type: none"> • Bactéries : <i>Bacillus subtilis</i> QST 713^A ; <i>Bacillus pumilus</i> QST 2808^{A,B} ; <i>Pseudomonas chlororaphis</i>^A • Virus atténué : Zucchini yellow mosaic virus - Weak Strain • Champignons : <i>Trichoderma harzianum</i>^M 	<ul style="list-style-type: none"> • Bactéries : <i>PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)</i>^M ; <i>Bacillus subtilis</i>^M ; <i>Bacillus pumilus</i>^{A,B} ; <i>Bacillus amyloliquifaciens</i>^M ; <i>Bacillus mycooides</i> ; <i>Pseudomonas fluorescens</i>^M ; <i>Ochrobactrum lupine</i> ; <i>Azospirillum brasilense</i> • Spores et mycélium de champignons : <i>PGPF (Plant Growth Promoting Fungi)</i> ; <i>Fusarium equiseti</i> ; <i>Trichoderma sp.</i>^M ; <i>Glomus sp.</i>^M ; <i>Piriforma indica</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Levures • Bactéries : <i>Bacillus amyloliquifaciens</i>^M ; <i>Bacillus subtilis</i>^M ; <i>Pseudomonas fluorescens</i>^M ; <i>PGPR</i>^M ; <i>Azotobacter sp.</i> ; <i>Rhizobium sp.</i> ; <i>Bradyrhizobium sp.</i> • Champignons : <i>PGPF</i> ; <i>Glomus sp.</i>^M ; <i>Trichoderma sp.</i>^M ; <i>Trichoderma harzianum</i>^M
	Extraits complexes d'algues		
		<ul style="list-style-type: none"> • Extraits d'algues : <i>Ulva sp.</i>^M ; <i>Ecklonia maxima</i>^M ; <i>Ascophyllum nodosum</i>^M ; <i>Laminaria sp.</i>^M 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits d'algues : <i>Ecklonia maxima</i> ; <i>Ascophyllum nodosum</i>^M ; <i>Lithothamnium calcareum</i> ; <i>Macrocystis pyrifera</i> ; <i>Ulva lactuca</i>^M ; <i>Sargassum plagiophyllum</i> ; <i>Dictyota dichotoma</i> ; <i>Laminaria sp.</i>^M ; <i>Fucus sp.</i>
	Extraits complexes de plantes		
	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits de Fenugrec 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits de plantes : Renouée de Sakhaline^{M,B} ; Ecorce de bourdaine^B ; Extraits de préle^{M,B} ; Extraits d'ortie^{M,B} 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits de plantes : Extraits d'ortie^M ; Extraits de préle^M ; Renouée de Sakhaline^M
	Extraits purifiés d'algues		
	<ul style="list-style-type: none"> • Laminarine (<i>Laminaria digitata</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Laminarine (<i>Laminaria sp.</i>) • Laminarine sulfatée • Ulvane (<i>Ulva sp.</i>) • Carraghénane • Extraits d'algues 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits d'algues • Extraits purifiés d'algues
	Extraits purifiés de plantes		
		<ul style="list-style-type: none"> • Oligosaccharides : Oligosaccharide de bardane ; Oligogalacturonide • Monosaccharides : Tréhalose ; Sucrose ; Psicose ; Allose 	<ul style="list-style-type: none"> • Oligosaccharides : Heptamaloxyloglucane^{PPP} • Monosaccharides • Protéines purifiées • Acides aminés purifiés • Glycine bêtaïne • Lignosulfonate
	Extraits purifiés de micro-organismes		
		<ul style="list-style-type: none"> • Extraits protéiques : Protéines ; Peptides ; Harpines ; Glycoprotéines ; Flagellines ; Protéines virales • Lipides : Rhamnolipides • Toxines • Chitosane (chitine modifiée)^M • Extraits de levures^M : Glucane 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraits de levures^M ; • Chitosane (chitine modifiée)^M • Glycine bêtaïne • Extraits protéiques ou peptidiques • Protéines purifiées • Peptides purifiés • Acides aminés purifiés
Extraits purifiés de macro-organismes			
	<ul style="list-style-type: none"> • Acide cholique • Chitine, Chitosane^M 	<ul style="list-style-type: none"> • Chitine, Chitosane^M • Protéines purifiées • Acides aminés purifiés 	

Tableau 2 - Origine et nature des produits de stimulation (suite)

Légende : B : SDP à action Biocide ; M : substance Mixte à action SDP et biostimulant ; A : SDP à action Antagoniste ; PPP : produit homologué en tant que PPP

Origine/nature	SDP commercialisés et homologués en France (Consultation liste e-phy octobre 2014)	SDP non commercialisés en France (encore au stade laboratoire ou commercialisés à l'étranger)	Biostimulants
Substances de synthèse d'origine non xénobiotique	Protéines, Peptides et Dérivés d'Acides aminés		
		<ul style="list-style-type: none"> • BABA (Acide β-Amino-Butyrique) • Lipopeptides bactériens : Fengy-cine ; Surfactine 	
	Lipides et dérivés lipidiques		
		<ul style="list-style-type: none"> • Jasmonate • Acide jasmonique (JA) • Methyljasmonate (MeJA) • Cis-jasmonate 	
	Autres substances non xénobiotiques		
		<ul style="list-style-type: none"> • Phytohormones : Ethylène ; Acide abscissique^M 	<ul style="list-style-type: none"> • Phytohormones : Auxine ; Cytokine ; Brassinostéroïdes ; Acide abscissique^M • Vitamines : Acide folique (B9) • Antioxydants : Tocophérol
Substances de synthèse d'origine xénobiotique	Analogues fonctionnels de l'acide salicylique		
	<ul style="list-style-type: none"> • ASM B (acibenzolar-S-méthyl) 	<ul style="list-style-type: none"> • BTH^B (Benzothiadiazole) et ASM^B (acibenzolar-S-méthyl) • INA (Acide isonicotinique) • DCINA (acide 2,6-dichloroisonicotinique) • Probenazole • Acétyl SA • Heptanoyl de SA 	
	Autres substances xénobiotiques		
	<ul style="list-style-type: none"> • Prohexadione-Calcium • Fosétyl-Aluminium^B 	Analogue fonctionnel du MeJa : <ul style="list-style-type: none"> • Coronatine • Saccharine • Prohexadione • Isotianil 	<ul style="list-style-type: none"> • ATCA (Acetyl-Thiazolidine-4-Carboxylic-Acid) • Nitrophénolate
Substances organo-minérales	Extraits minéraux		
	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphite de potassium^B 	<ul style="list-style-type: none"> • Poudres de roche^M : Silicate • Ions minéraux : Phosphonate^B et Phosphite^B de potassium ; Sel de cuivre^B, Sel de zinc 	<ul style="list-style-type: none"> • Substances humiques (extraites de léonardite) : Acide humique ; Acide fulvique • Poudres de roche^M : Silicate

Source : auteurs, rapport final de l'étude, pages 39-42

Tableau 3 - Détail des revendications agronomiques associées aux produits de stimulation

Catégorie	Détails des effets revendiqués*	
SDP		
Résistance aux stress biotiques	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance induite aux champignons, bactéries, virus, nématodes, insectes, et plantes parasites 	<ul style="list-style-type: none"> • Potentialisation des défenses • Formation d'un bouclier protecteur autour des racines
Biostimulant		
Résistance aux stress abiotiques	<ul style="list-style-type: none"> • Tolérance accrue au froid, gel ou au chaud • Tolérance à la salinité 	<ul style="list-style-type: none"> • Tolérance aux stress oxydatifs (dont UV, ozone) • Tolérance accrue à la sécheresse ou à l'excès d'eau
Croissance et développement	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du taux de germination • Précocité accrue de la germination • Stimulation du nombre d'inflorescences • Développement favorisé des bourgeons • Stimulation de la croissance végétative • Stimulation de la production d'hormones végétales bénéfiques à la croissance 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la biomasse foliaire • Stimulation du développement racinaire en densité et profondeur • Renforcement du système racinaire • Amélioration de l'efficacité photosynthétique • Augmentation de la teneur en chlorophylle
Meilleure absorption des éléments nutritifs	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la nutrition des plantes • Augmentation de la biodisponibilité des éléments minéraux • Solubilisation des éléments minéraux • Amélioration de l'absorption de l'azote • Renforcement de la capacité d'absorption de l'eau et des nutriments • Optimisation de la libération des éléments nutritifs • Amélioration de la structure physique des sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation de mycorhizes • Stimulation de la nitrate réductase • Production d'auxines par la microflore • Stimulation de l'activité microbienne du sol • Stimulation de la dégradation de la matière organique • Augmentation de la diversité et de l'activité microbiologique des sols
Meilleure qualité des récoltes	<ul style="list-style-type: none"> • Organoleptique (teneur en sucre et autres molécules) • Nutritionnelle (teneur en vitamines, protéines, nutriments, sucres, etc.) • Visuelle (couleur des fruits) 	<ul style="list-style-type: none"> • Technique (meilleure tolérance au stockage ou à la manipulation) • Amélioration de la fermeté des fruits pour le stockage
Produits de stimulation		
Gain économique (dont augmentation des rendements)	<ul style="list-style-type: none"> • Action positive sur le tallage et le grossissement des grains • Amélioration du calibre des fruits • Augmentation de la quantité de graines • Augmentation de la quantité de fruits 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des produits phytopharmaceutiques • Amélioration de l'efficacité des engrais pour en réduire la quantité • Action longue durée permettant de limiter la quantité de produits utilisés
Gain environnemental	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de danger pour l'homme, les plantes et l'environnement • Réduction des produits phytopharmaceutiques classiques • Amélioration de l'efficacité des engrais pour en réduire la quantité • Augmentation de la diversité microbiologique des sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Limite l'apparition de souches d'agents pathogènes résistants • Diminution de l'utilisation d'eau • Action longue durée permettant de limiter la quantité de produits utilisés
* Liste non exhaustive et pouvant évoluer avec l'apparition de nouvelles substances actives		

Source : auteurs, rapport final de l'étude, page 45

Références bibliographiques

- AFPP, 2013, « Stimulation des défenses des végétaux cultivés (Fiche AFPP 5.12) », dans : Bernard J.-L. (dir.), *Protection Intégrée des Cultures - Fiches pour le conseil des techniques utilisables*, Éditions La France Agricole, pp. 207-210.
- Ahuja I., Kissen R. et Bones A. M., 2012, « Phytoalexins in defense against pathogens », *Trends in plant science*, 17(2).
- ANSES, 2009, *Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à une demande d'autorisation de mise sur le marché de la préparation TRIANUM P, à base de Trichoderma harzianum, souche T22, de la société KOPPERT BV.*
- ANSES, 2013, *Note d'information aux pétitionnaires concernant l'homologation des MFSC.*
- Beckers G. et Conrath U., 2007, « Priming for stress resistance: from the lab to the field », *Current opinion in plant biology*, 10(4), pp. 425-31.
- Blanchard A. et Limache F., 2005, *Les stimulateurs des défenses naturelles des plantes (SDN) Rapport bibliographique*, DAA Protection des plantes et environnement, ENSAM, ENSAR et INA P-G. Lien : http://www.enroweb.com/misc/Rapport_SDN.pdf
- Calvo P., Nelson L. et Kloepper J. W., 2014, « Agricultural uses of plant biostimulants », *Plant and soil*, October, volume 383, Issue 1, pp 3-41.
- CEB-AFPP, 2011, *Répertoire terminologique en protection des plantes*, Lien : <http://www.afpp.net/apps/accesbase/bindocload.asp?d=6016ett=0etidobj=qpg796Noe-tuid=57305290etsid=57305290etidk=1>
- Chen S.-K., Subler S. et Edwards C. A., 2002, « Effects of agricultural biostimulants on soil microbial activity and nitrogen dynamics », *Applied Soil Ecology*, 19(3).
- Cipollini D., Enright S., Traw M. et Bergelson J., 2004, « Salicylic acid inhibits jasmonic acid-induced resistance of *Arabidopsis thaliana* to *Spodoptera exigua* », *Molecular Ecology*, vol.13.
- Dann E., Diers B., Byrum J. et Hammerschmidt R., 1998, « Effect of treating soybean with 2,6- dichloroisonicotinic acid (INA) and benzothiadiazole (BTH) on seed yields and the level of disease caused by *Sclerotinia sclerotiorum* in field and greenhouse studies », *European Journal of Plant Pathology*, volume 104.
- Dietrich R., Ploss K. et Heil M., 2004, « Constitutive and induced resistance to pathogens in *Arabidopsis thaliana* depends on nitrogen supply », *Plant, Cell and Environment*, volume 27.
- Dietrich R., Ploss K. et Heil M., 2005, « Growth responses and fitness costs after induction of pathogen resistance depend on environmental conditions », *Plant, Cell et Environment*, 28(2), pp. 211-222.

- Dufour M.-C., 2011, *Étude de l'efficacité des défenses de différents génotypes de Vitis induites par élicitation face à la diversité génétique de bioagresseurs (Plasmopara viticola et Erysiphe necator) : du gène au champ*, thèse, Université Bordeaux - Victor Segalen. Lien : https://www6.bordeaux-aquitaine.inra.fr/sante.../these_MCDufour.pdf
- Du Jardin P., 2012. *The science of plant biostimulants - A bibliographic analysis*, European Commission. Lien : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/169257>
- Durand N., Briand X. et Meyer C., 2003, « The effect of marine bioactive substances (N PRO) and exogenous cytokinins on nitrate reductase activity in Arabidopsis thaliana », *Physiologia Plantarum*, 119(4).
- EBIC, 2011, *Indicative list of some existing biostimulant products and claims*, European Biostimulants Industry Council.
- Faessel L., 2008, *Résistance induite par l'acibenzolar-S- méthyl sur soja et conséquences sur la rhizosphère*, Thèse de doctorat en biologie, Mulhouse.
- Faessel L. et Morot-Gaudry J.-F., 2009, « Les stimulateurs de nutrition et autres produits émergents à la lumière de la physiologie », Rencontres de Blois, les 25 et 26 novembre 2009. Lien : http://www.comifer.asso.fr/images/publications/livres/2%20-%20faessel%20-%20morot_gaudry.pdf
- Ferrara G. et al., 2013, « Application of Abscisic Acid (S-ABA) to 'Crimson Seedless' Grape Berries in a Mediterranean Climate: Effects on Color, Chemical Characteristics, Metabolic Profile, and S-ABA Concentration », *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(3), pp. 491-505.
- Ferreira M. et Lourens A., 2002, « The efficacy of liquid seaweed extract on the yield of canola plants », *South African Journal of Plant and Soil*, 19(3).
- Finkelstein R. R., Gampala S. S. L. et Rock C. D., 2002, « Abscisic Acid Signaling in Seeds and Seedlings », *The Plant Cell*, 14 (suppl.1), pp. S15-S45.
- Forbes V.-E. et Forbes T.-L., 1997, *Écotoxicologie : théorie et applications*, Paris, INRA Editions.
- Garcia-Brugger A. et al., 2006, « Early signaling events induced by elicitors of plant defenses », *Molecular plant-microbe interactions*, 19(7).
- Grabowska A. et al., 2012, « The Effect of Cultivar and Biostimulant Treatment on the Carrot Yield and its Quality », *Vegetable Crops Research Bulletin*, volume 77.
- Guntzer F., Keller C. et Meunier J.-D., 2011, « Benefits of plant silicon for crops: a review », *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1).
- Heil M., 2001, « The ecological concept of costs of induced systemic resistance (ISR) », *European Journal of Plant Pathology*, volume 107.

- Hill S.B., MacRae R.J., 1995, « Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture », *Journal of sustainable agriculture*, 7 (1), pp. 81-87.
- Hoffmann-Sommergruber K., 2002, « Pathogenesis-related (PR)-proteins identified as allergens », *Biochemical Society Transactions*, volume 30, pp. 930-935.
- Khan W. *et al.*, 2009, « Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development », *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4).
- Klarzynski O., Fablet E., Euzen M. et Joubert J.-M., 2006, « État des connaissances sur les effets des extraits d'algues sur la physiologie des plantes », *Phytoma*, Issue 597.
- Lian B., Zhou X., Miransari M. et Smith D., 2000, « Effects of salicylic acid on the development and root nodulation of soybean seedlings », *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185(3).
- Lugtenberg B. et Kamilova F., 2009, « Plant-growth-promoting rhizobacteria », *Annual review of microbiology*, volume 63.
- Malandain H. et Lavaud F., 2004, « Allergénicité de protéines de défense végétale », *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique*, volume 44.
- Munné-Bosch S., 2005, « The role of alpha-tocopherol in plant stress tolerance », *J Plant Physiol*, 162(7), pp. 743-8.
- Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A. et Vianello A., 2002, « Physiological effects of humic substances on higher plants », *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11).
- Pajot E. et Regnault-Roger C., 2008, « Stimulation des défenses naturelles des plantes et résistance induite : une nouvelle approche phytosanitaire ? », *Biopesticides d'origine végétale*, Paris: TecetDoc.
- Papenfus H. *et al.*, 2013, « Effect of a commercial seaweed extract (Kelpak) and polyamines on nutrient-deprived (N, P and K) okra seedlings », *Scientia Horticulturae*, volume 151.
- Phytoma, 2005, « Mécanismes d'action de l'extrait d'algue GA7 », *La défense des végétaux*, 585, pp. 42-44.
- Pieterse C., Schaller A., Mauch-Mani B. et Conrath U., 2006, « Signaling in plant resistance responses: divergence and cross-talk of defense pathways », dans : Bent E. et Tuzun S. (dir.), *Multigenic and induced systemic resistance in plants*, Springer, pp. 166-196.
- RMT Elicitra, 2012, *Guide méthodologique d'évaluation de l'efficacité des Stimulateurs des Défenses des Plantes (SDP)*.
- RMT Elicitra, 2013, *Projet de RMT ELICITRA - Comprendre, développer et promouvoir au sein des filières végétales les stratégies de stimulation de défense des plantes*.
- RMT Elicitra, 2014, *Tableau bilan des résultats obtenus par les partenaires du RMT*.

- Ross A., 1961, « Systemic acquired resistance induced by localized virus infections in plant », *Virology*, volume 14.
- Schilmiller A. L. et Howe G. A., 2005, « Systemic signalling in the wound response, *Current Opinion in Plant Biology* 8 », volume 8.
- Senthil-Kumar M. et Mysore K. S., 2013, « Nonhost resistance against bacterial pathogens: retrospectives and prospects », *Annual review of phytopathology*, volume 51, pp. 407-427.
- Shekhar Sharma H. *et al.*, 2013, « Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses », *Journal of Applied Phycology*, 26(1).
- Sivasangari Ramya S., Nagaraj, S. et Vijayana, N., 2011, « Influence of Seaweed Liquid Extracts on Growth, Biochemical and Yield Characteristics of *Cyamopsis tetragolaba* (L.) Taub », *Journal of phytology*, 3(9).
- Steimetz E. *et al.*, 2012, « Influence of leaf age on induced resistance in grapevine against *Plasmopara viticola* », *Physiological and Molecular Plant Pathology*, volume 79.
- Szabo V. et Hrotko K., 2009, « Preliminary results of Biostimulator Treatments on *Crataegus* and *Prunus* stockplants », *Bulletin UASVM Horticulture*, 66(1).
- Terres d'innovation, 2009, *Stimulation des mécanismes de défenses naturelles des plantes - Protection des cultures, production de composés secondaires d'intérêt.*
- Thakur M. et Sohal B., 2013, « Role of Elicitors in Inducing Resistance in Plants against Pathogen Infection: A review », *ISRN Biochemistry*.
- Thaler J., 1999, « Jasmonic Acid Mediated Interactions Between Plants, Herbivores, Parasitoids, and Pathogens: A Review of Field Experiments in Tomato », dans: A. A. Agrawal, S. Tuzun et E. Bent, édés, *Induced plant defenses against pathogens and herbivores: biochemistry, ecology, and agriculture*, American Phytopathological Society Press, pp. 319-334.
- Tosi L. et Zizzerini A., 2000, « Interactions between *Plasmopara helianthi*, *Glomus mosseae* and Two Plant Activators in Sunflower Plants », *European Journal of Plant Pathology*, volume 106.
- Trevisan S., Francioso O., Quaggiotti S. et Nardi S., 2010, « From environmental aspects to molecular factors Humic substances biological activity at the plant-soil interface », *Plant signaling and behavior*, 5(6).
- Van Breusegem F. et Dat J. F., 2006, « Reactive Oxygen Species in Plant Cell Death », *Plant Physiology*, 141 (juin), pp. 384-390.
- Van Breusegem F., Vranová E., Dat J. et D I., 2001, « The role of active oxygen species in plant signal transduction », *Plant Science*, volume 161.

- Walters D. R., 2009, « Are plants in the field already induced ? Implications for practical disease control », *Crop Protection*, volume 28, pp. 459-465.
- Walters D. R. *et al.*, 2011, « Cultivar Effects on the Expression of Induced Resistance in Spring Barley », *Plant disease*, volume mai.
- Walters D. R., Ratsep J. et Havis N. D., 2013, « Controlling crop diseases using induced resistance : challenges for the future », *Journal of experimental botany*, 64(5).
- Walters D. R., Ratsep J. et Havis N. D., 2013, « Controlling crop diseases using induced resistance : challenges for the future », *Journal of experimental botany*, 64(5), pp. 1263-1280.
- Walters D., Walsh D., Newton A. et Lyon G., 2005, « Induced Resistance for Plant Disease Control: Maximizing the Efficacy of Resistance Elicitors », *Phytopathology*, 95(12), pp. 1368-1373.
- Yildirim E., Dursun A., Kumlay M. A. et Güvenç Í., 2002, « The effects of different salt, bio-stimulant and temperature levels on seed germination of some vegetable species », *Acta Agrobotanica*, 55(2).
- Zeier J., Pink B., Mueller M. J. et Berger S., 2004, « Light conditions influence specific defence responses in incompatible plant–pathogen interactions: uncoupling systemic resistance from salicylic acid and PR-1 accumulation », *Planta*, 219(4), pp. 673-683.

Recommandations aux auteurs

● Format

Les manuscrits sont présentés sous format Word ou Writer en police de taille 12. Ils ne dépassent pas 50 000 signes espaces inclus, y compris tableaux, graphiques, bibliographie et annexes.

Sur la première page du manuscrit doivent figurer :

- le titre de l'article ;
- le(s) nom(s) de(s) auteur(s) et leur(s) institution(s) ;
- le résumé de l'article (800 signes espaces compris) en français et en anglais ;
- trois à six mots-clés en français et en anglais.

Toutes les sources des chiffres cités doivent être précisées. Les sigles doivent être explicités. Lorsque l'article s'appuie sur une enquête, des traitements de données, etc., un encadré présentant la méthodologie est souhaité. Pour une meilleure lisibilité, les notes de bas de page doivent être limitées en nombre et en longueur.

Les références bibliographiques sont présentées ainsi :

- a** - Dans le texte ou les notes, chaque référence citée est constituée du nom de l'auteur et de l'année de publication entre parenthèses, renvoyant à la bibliographie en fin d'article. Par exemple : (Griffon, 2004).
- b** - À la fin de l'article, les références sont classées par ordre alphabétique d'auteurs et présentées selon les normes suivantes :
 - pour un ouvrage : nom de l'auteur, initiale du prénom, année, *Titre d'ouvrage*, ville, maison d'édition ;
 - pour un article : nom de l'auteur, initiale du prénom, année, « Titre d'article », *Revue*, n° de parution, mois, pages.

Seules les références explicitement citées ou mobilisées dans l'article sont reprises en fin d'article.

● Compléments pour mise en ligne de l'article

Dans la perspective de la publication de l'article sur le site internet du CEP et toujours selon leur convenance, les auteurs sont par ailleurs invités à :

- adresser le lien vers leur(es) page(s) personnelle(s) à caractère « institutionnelle(s) » s'ils en disposent et s'ils souhaitent la(les) communiquer ;
- communiquer une liste de références bibliographiques de leur choix utiles pour, contextualiser, compléter ou approfondir l'article proposé ;
- proposer une liste de lien vers des sites Internet pertinents pour se renseigner sur le sujet traité ;
- proposer, le cas échéant, des annexes complémentaires ou des développements utiles mais non essentiels (précisions méthodologiques, exemples, etc.) rédigés dans la phase de préparation de l'article mais qui n'ont pas vocation à intégrer la version livrée, limitée à 50 000 caractères. Ces compléments, s'ils sont publiables, viendront enrichir la version Internet de l'article.

● Procédure

Tout texte soumis est lu par au moins 3 membres du comité de rédaction. Deux fiches de lecture rédigées par un des membres du comité de rédaction et par un expert extérieur sont transmises aux auteurs. La décision de publication est prise collectivement par le comité de rédaction. Tout refus est argumenté.

Les manuscrits sont à envoyer, en version électronique uniquement, à :

- Florent Bidaud, secrétaire de rédaction : florent.bidaud@agriculture.gouv.fr
- Bruno Hérault, rédacteur en chef : bruno.herault@agriculture.gouv.fr

● Droits

En contrepartie de la publication, l'auteur cède à la revue *Notes et Études Socio-Économiques*, à titre exclusif, les droits de propriété pour le monde entier, en tous formats et sur tous supports, et notamment pour une diffusion, en l'état, adaptée ou traduite. À la condition qu'il demande l'accord préalable à la revue *Notes et Études Socio-Économiques*, l'auteur peut publier son article dans un livre dont il est l'auteur ou auquel il contribue à la condition de citer la source de première publication, c'est-à-dire la revue *Notes et Études Socio-Économiques*.

Notes et études socio-économiques

Tous les articles de *Notes et Études Socio-Économiques* sont téléchargeables gratuitement sur :

<http://agriculture.gouv.fr/centre-d-etudes-et-de-prospective>

- Rubrique **Publications du CEP > Notes et études socio-économiques**

<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr>

- Rubrique **Publications > Notes et études socio-économiques**

Abonnement à l'alerte électronique en envoyant un message à l'adresse :

florent.bidaud@agriculture.gouv.fr avec le sujet « **abonnement** »

Notes et études socio-économiques

Ministère de l'Agriculture,
de l'Agroalimentaire et de la Forêt
Secrétariat Général
Service de la Statistique et de la Prospective
Centre d'études et de prospective

Renseignements :

Service de la Statistique et de la Prospective
Centre d'Études et de Prospective
3 rue Barbet de Jouy
75349 Paris 07 SP

Diffusion :

Service de la Statistique et de la Prospective
Bureau des ventes – BP 32688
31326 – Castanet Tolosan cedex

Vente au numéro : agreste-ventes@agriculture.gouv.fr
fax : 05.61.28.93.66

Abonnement : tél. : 05.61.28.93.05