

Facteurs Nod et Myc : des molécules signal au champ pour un gain de productivité des cultures¹



Novembre 2025
Valérie Molinéro-Demilly
Sandra Bensmihen
Pierre Benoit Joly

Etude de cas du département de recherche **SPE (Santé des Plantes et Environnement)** réalisée selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

¹ Cette étude reprend et actualise l'analyse ASIRPA Facteurs Nod et Myc : des molécules signal aux champs pour un gain de productivité des cultures, réalisée en 2014.

Résumé

Dans les années 1970, Pierre Boistard et Jean Dénarié, alors chercheurs à l'INRA de Versailles, proposent à la Direction générale un projet ambitieux : comprendre les mécanismes génétiques fondamentaux des interactions entre plantes et micro-organismes. À cette époque marquée par les premières crises pétrolières et par l'essor des biotechnologies, la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les céréales est une promesse qui permet de mobiliser de nombreux soutiens.

Les investissements dans cette voie de recherche auront un impact scientifique majeur en renouvelant l'approche des interactions entre plantes et micro-organismes. Si la promesse de la fixation de l'azote par les céréales n'a pas été tenue, des applications majeures en seront issues. En particulier, l'équipe de Jean Dénarié du LIPM² (UMR INRA/CNRS implantée à Toulouse en 1981) a découvert dans les années 1990 les lipochito-oligosaccharides (LCO). Elle a démontré que parmi ces molécules de signalisation, les facteurs Nod (Nodulation) -LCO (Nod-LCOs) produites par les bactéries de type rhizobia déclenchent le processus de nodulation chez les légumineuses. Dans les années 2010, cette même équipe a montré que certains champignons (champignons mycorhiziens à arbuscules et ecto mycorhiziens) produisent également des LCO (Myc-LCOs) qui leur permettent d'établir des relations symbiotiques avec les plantes. Les chercheurs ont également observés que les LCOs peuvent stimuler le développement du système racinaire.

Ces découvertes ont été brevetées par les tutelles du LIPM (CNRS et INRA). Des licences exclusives ont été concédées à un acteur industriel qui a mis au point des produits, aujourd'hui utilisés dans de nombreux pays. Cet acteur industriel a observé lors d'essais au champ que les biostimulants à base de LCOs augmentent les rendements de 3% environ. En 2024, les Nod-LCOs sont utilisés sur 3 millions d'hectares pour les légumineuses quand les Myc-LCOs sont utilisés sur 17 millions d'hectares, principalement pour le maïs.

Summary

In the 1970s, Pierre Boistard and Jean Dénarié, then researchers at INRA Versailles, formulated an ambitious project: to understand the fundamental genetic mechanisms of interactions between plants and micro-organisms. At a time marked by the first oil crises and the rise of biotechnologies, the symbiotic fixation of atmospheric nitrogen by cereals held out the promise of attracting a great deal of support.

Investment in this area of research will have a major scientific impact, renewing the approach to interactions between plants and micro-organisms. If the promise of nitrogen fixation by cereals has not been fulfilled, major applications will emerge. In the 1990s, Jean Dénarié's team at LIPM² (INRA/CNRS in Toulouse) discovered lipochito-oligosaccharides (LCOs). They demonstrated that these signaling molecules, "called Nodulation Factors (or Nod-LCOs)", produced by rhizobia trigger the nodulation process in leguminous plants. In the 2010s, the same team demonstrated that certain fungi (arbuscular mycorrhizal fungi and ecto mycorrhizal fungi) also produce LCOs, enabling them to establish symbiotic relationships with plants. Researchers have also observed that LCOs can stimulate root system development.

These discoveries have been patented by LIPM's supervisory bodies (CNRS and INRA). Exclusive licenses have been granted to an industrial player who has developed products that are now used in many countries. This industry player has observed that during field trials LCO-based biostimulants increase yields by around 3%. Nod-LCOs are used on 3 million hectares for legumes, while Myc-LCOs are used on 17 million hectares, mainly for corn.

² Laboratoire de recherche sur la biologie des Interactions Plantes-Microbes

Problématiques sociétales initiales et contexte externe initial

Les recherches sur les interactions symbiotiques pour la fixation de l'azote ont permis de mettre en évidence le rôle des lipochito-oligosaccharides (LCO), des molécules de signalisation produites par les bactéries de type rhizobia qui déclenchent le processus de nodulation chez les légumineuses. Par la suite, la recherche a montré que les LCOs favorisent également les relations symbiotiques entre les racines des plantes et les mycorhizes. Cela a conduit à développer des produits favorisant la croissance des céréales.

Les activités dont il est question dans cette étude de cas sont des recherches à double impact. Tout en visant à répondre à une problématique sociétale importante, les chercheurs avaient comme objectif de comprendre les interactions plantes-microbes à partir d'approches nouvelles fondées sur la génétique moléculaire. Dans les lignes qui suivent, nous explicitons également le problème sociétal tel qu'il était perçu à l'époque.

Contexte

La fixation de l'azote par les plantes en symbiose avec des bactéries

Les plantes ne peuvent pas assimiler directement l'azote moléculaire (N_2), constituant majeur de l'atmosphère. Aussi l'azote nécessaire à leur croissance leur est fourni sous forme d'engrais constitués de nitrates ou d'ammonium. Pour limiter cette fertilisation azotée, consommatrice d'énergie, source de pollution des eaux et d'émission de gaz à effet de serre (GES), les chercheurs d'INRAE étudient des stratégies visant à augmenter la fixation biologique de l'azote. L'azote N_2 est une molécule très stable dans laquelle les deux atomes d'azote sont unis par une triple liaison. Aucun organisme supérieur (eucaryote) n'est capable de briser cette triple liaison. Seules des bactéries (procaryotes) disposent du complexe enzymatique, la nitrogénase, capable de « fixer l'azote » c'est-à-dire de réduire N_2 en ammoniac NH_3 . La fixation de l'azote est un processus nécessitant beaucoup d'énergie, et ce sont les bactéries « fixatrices d'azote » qui le réalisent le plus efficacement lorsqu'elles sont en symbiose avec des organismes photosynthétiques, comme les plantes. Les plantes de la famille des légumineuses forment ainsi une symbiose avec des bactéries fixatrices du sol appelées *Rhizobium* qui induisent la formation de structures racinaires nouvelles, les nodosités, où les bactéries peuvent se multiplier. Les nodosités ainsi formées sont de véritables organes permettant des échanges métaboliques entre les deux partenaires. La plante fournit des composés carbonés et de l'énergie aux bactéries qui en échange transforment l'azote de l'air en ammoniac fourni à la plante-hôte pour sa nutrition azotée. Divers *Rhizobium* s'associent spécifiquement avec des légumineuses d'intérêt agronomique comme le soja, les haricots, la fève, le pois, l'arachide, la luzerne et le trèfle. L'assimilation de l'ammoniac fixé permet aux plantes hôtes de croître dans des sols pauvres en azote et réduit leurs besoins en engrais azotés.

La fixation symbiotique azotée mondiale représente entre 100 et 290 millions de tonnes (Mt) d'azote par an soit autant, voire plus que la production azotée industrielle annuelle dans le monde (plus de 105 Mt d'azote par an), (Schneider et al., 2015).

Les engrais azotés : sources de pollution majeure

La consommation d'engrais azotés au niveau mondial est très importante. Toutefois, après une intensification agricole basée sur l'utilisation systématique d'azote (des années 1960 aux années 1990), l'utilisation de méthodes de fertilisation raisonnée a permis de réduire la progression de ces

apports. L'azote sous forme de nitrates est facilement assimilable par les plantes, cependant facilement lessivable. On retrouve les nitrates couramment dans les eaux de ruissellement et dans certaines nappes souterraines. Il s'en suit une eutrophisation des eaux de surface (lacs, réservoirs et mares), traduite par un développement excessif d'algues vertes. Dans de nombreux cas, les niveaux de nitrate sont tels que les eaux sont impropres à la consommation.

Les légumineuses : plantes fixatrices d'azote en symbiose

Les légumineuses ont été les premières plantes domestiquées, et cultivées en association avec des céréales : pois, fève et lentilles dans le croissant fertile³ avec le blé et l'orge ; haricot et lupin en Amérique centrale et australe avec le maïs ; soja avec le riz en Asie. Leur aptitude à fixer, en symbiose bactérienne, l'azote de l'air leur permettait une croissance forte même dans des sols pauvres et une grande valeur nutritive par leur richesse en protéines. Parmi les légumineuses cultivées, on distingue les légumineuses fourragères (trèfle, luzerne...) des prairies pâturées ou récoltées sous forme de fourrage donné aux animaux d'élevage, celles cultivées pour leurs graines comme les légumineuses à graines (lentille, pois chiche, vesce), les oléagineux (soja), et les protéagineux (pois, fève, féverole, lupin doux) destinées à l'alimentation animale ou humaine (Schneider et *al.*, 2015). La culture des légumineuses présente trois grands avantages :

- (i) Elle permet de réduire sensiblement les émissions de gaz à effets de serre. *A contrario*, la fabrication et l'épandage d'engrais azotés réclament des quantités importantes de gaz naturel (de 55 % à 65 % du bilan énergétique d'une grande culture). D'autre part la fertilisation azotée entraîne des émissions de peroxyde d'azote, un gaz qui est 300 fois plus actif comme gaz à effet de serre que le CO₂.
- (ii) Les légumineuses constituent des engrais verts : elles fertilisent naturellement les sols, ne nécessitent pas d'engrais azotés et sont très utilisées dans la rotation des cultures.
- (iii) Ces plantes sont riches en protéines et en fibres qui sont utilisées pour l'alimentation humaine (réduction du cholestérol avec les fibres) et animale (élévation de la teneur en protéine de la ration).

A l'heure actuelle les légumineuses fournissent 35% des protéines consommées sur notre planète. Depuis la seconde guerre mondiale, la production de légumineuses a beaucoup augmenté au niveau mondial, surtout aux Etats-Unis. Cela est essentiellement dû au développement des élevages industriels et à l'utilisation du soja comme complément nutritionnel des céréales pour la fabrication des aliments du bétail. Du fait des accords du commerce international, l'Europe et la France font partie des rares régions du monde dans lesquelles la culture des légumineuses a diminué depuis la seconde guerre mondiale. Ainsi, l'Europe est dépendante des importations pour les animaux. En effet, 1/3 des besoins de la France et 3/4 au niveau européen sont couverts par des importations principalement de graines et de tourteaux de soja (Schneider et *al.*, 2015).

Contributions d'INRAE et de ses partenaires hors-INRAE (Inputs)

Les facteurs Nod

A l'INRA, les recherches concernant la fixation biologique de l'azote ont été initiées dans les années 1970. Le laboratoire de Microbiologie des sols de Dijon a étudié l'écologie des *Rhizobium* dans les sols et a contribué au développement de l'inoculation des légumineuses en France avec des souches

³ [https : larousse.fr>encyclopedie>autre region](https://larousse.fr/encyclopedie/autre_region) : Région du Proche-Orient, qui s'étend de la mer Morte au golfe Persique en passant par le sud de la Turquie, le nord de l'Iraq et l'Iran occidental(les pays qu'elle regroupe, riches en plaines et en vallées bien arrosées, ont vu naître l'agriculture au néolithique).

sélectionnées de *Rhizobium*, pour le soja, la luzerne et le lupin. Dès le début des années 1970, Jean Dénarié, alors chercheur à la Station de Pathologie Végétale de Versailles, projette d'utiliser les outils de la génétique moléculaire pour étudier la symbiose des légumineuses. Avec Pierre Boistard, il formule un projet très ambitieux qui vise à développer les approches génétiques des interactions entre plantes et micro-organismes. Ensemble, ils rédigent dès 1973 des rapports à l'attention de la Direction générale de l'INRA afin d'obtenir les moyens nécessaires. Ces efforts aboutissent en 1981 à la création du Laboratoire de recherche sur la biologie des Interactions Plantes-Microbes (LIPM) à Toulouse, unité mixte de recherche INRA/CNRS, l'ancêtre du Laboratoire des Interactions Plantes-Microbes-Environnement (LIPME).

Cette création s'inscrit dans la stratégie nationale de développement des biotechnologies. Le Laboratoire bénéficie sans nul doute de la promesse de la fixation biologique de l'azote qui est alors mise en exergue dans la communication nationale de l'INRA :

Fixation directe de l'azote atmosphérique par les végétaux supérieurs. (...les gènes (les gènes NIF responsables de la fixation biologique de l'azote) sont présents dans toutes les bactéries fixatrices d'azote et certains chercheurs ont réussi à les transférer par manipulation génétique à d'autres bactéries. Ceci permettra une bonne connaissance de ces gènes et laisse espérer la possibilité de les transmettre à des végétaux cultivés (prévision : 25 ans)⁴.

Toulouse est aussi le site choisi par Elf Aquitaine, groupe pétrolier nationalisé, pour implanter ses activités de recherche en biotechnologie. Particulièrement impliqué dans la production d'ammoniac, Elf soutiendra fortement les activités du laboratoire.

C'est ainsi que dans le cadre du nouveau laboratoire toulousain, Jean Dénarié mobilise les moyens nécessaires pour analyser la génétique de la symbiose. Il s'attaque tout d'abord aux mécanismes par lesquels les *Rhizobium* sont en mesure de provoquer la formation des nodosités. La première étape a consisté à développer des outils génétiques pour *Sinorhizobium meliloti* (*S. meliloti*), la bactérie symbiotique de la luzerne. L'équipe de Dénarié a alors montré que chez *S. meliloti* les gènes contrôlant la formation des nodosités et la fixation de l'azote sont situés sur un plasmide⁵ de très grande taille. Sur ce mégaplasmide, les gènes *Nod* (pour nodulation) qui contrôlent la spécificité d'hôte, l'infection et la nodulation, ont pu être clonés et caractérisés. Une collaboration interdisciplinaire avec les équipes de Georges Truchet du LIPM et Jean Claude Promé (CRBGC⁶, CNRS Toulouse) ont montré que ces gènes *Nod* modulent la production de signaux symbiotiques extracellulaires, les facteurs Nod, qui sont des lipochito-oligosaccharides (LCOs). L'identification de ces molécules a été faite en 1990, donnant lieu à un article dans la revue Nature (Lerouge *et al.*, 1990). Des substitutions variées du squelette de base de ces molécules leur confèrent leur spécificité, impliquée dans la reconnaissance pour la symbiose par les plantes-hôtes. Les facteurs Nod ont une grande activité biologique. Sur les racines de légumineuses-hôtes, à des concentrations de l'ordre du nano (10^{-9} mole par Litre) ou picomolaire (10^{-12} mole par Litre), ils provoquent des réponses symbiotiques similaires à celles provoquées par les bactéries elles-mêmes. En outre, ils peuvent stimuler le développement du système racinaire. Ces signaux sont donc des régulateurs de croissance et constituent le premier exemple montrant que des oligosaccharides naturels peuvent être impliqués dans le contrôle du développement chez les plantes (cf. Figure 1).

Ces découvertes ont permis le dépôt de deux brevets en 1990 « Methods of producing substances of a lipo-oligosaccharidic nature liable to act as a plant specific symbiosis signals » et en 1992 « Wide host spectrum rhizobiaceae nodulation signals » par l'INRA et le CNRS. Une collaboration s'est engagée en 2000 entre le LIPM et la PME américaine NITRAGIN, leader mondial pour la production

⁴ INRA (1986). Quelques thèmes de recherche sur les biotechnologies végétales. Cité par Cornu *et al.*, p.262.

⁵ Plasmide : petite chaîne d'ADN bactérien autonome et susceptible d'être transmise entre bactéries de la même espèce ou non.

⁶ Centre de Recherche en Biochimie et Génétique Cellulaires.

des inoculants bactériens pour les légumineuses depuis plus d'un siècle, et propriété de la société LIPHATEC.

Des résultats, obtenus en condition de laboratoire, avaient déjà montré que les facteurs Nod peuvent stimuler la nodulation et la croissance du système racinaire. Cette collaboration avec NITRAGIN avait

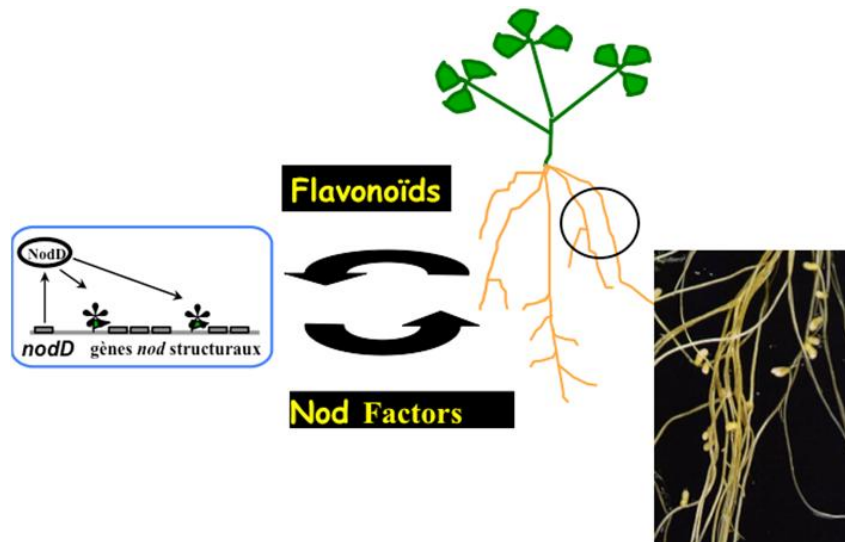


Figure 1 : Les résultats, obtenus en condition de laboratoire, montrent que chez *S. meliloti*, les gènes *Nod* qui modulent la production de signaux symbiotiques extracellulaires sont situés sur un plasmide de très grande taille. Ces facteurs Nod peuvent stimuler la nodulation et la croissance du système racinaire.

donc pour but de déterminer si le traitement de graines de légumineuses par une culture de *Rhizobium* enrichie en facteurs Nod pouvait avoir une influence sur la nodulation et le rendement dans des conditions agronomiques. Les essais au champ sont réalisés par la société (cf. Figure 2).

Des résultats encourageants ayant été obtenus, des licences exclusives sur les deux brevets liés aux facteurs Nod ont été concédées en 2002 à la société LIPHATEC qui s'est alors engagée dans des contrats de recherche financièrement importants avec l'INRA et le CNRS pour des travaux réalisés au LIPM. NITRAGIN a ensuite été achetée par l'entreprise chimique EMD en 2006 et par la société Novozymes en 2011. Il faut noter que, malgré leurs investissements, les partenaires industriels successifs ont accepté que l'ensemble des résultats obtenus appartiennent aux organismes de recherche publics.

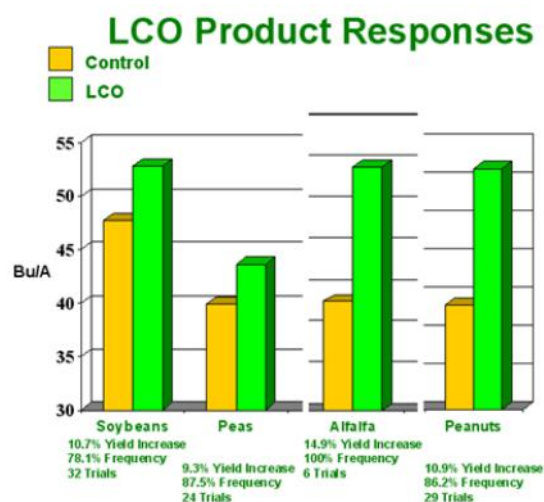


Figure 2 : Les résultats des essais au champ réalisés par la société NITRAGIN montrent que le traitement de graines de légumineuses par une culture de *Rhizobium* enrichie en facteurs Nod ont une influence sur la nodulation et le rendement dans des conditions agronomiques.

Les facteurs Myc

Les endomycorhizes à arbuscules sont des symbioses fongiques très répandues dans le monde végétal (plus de 80% des espèces végétales). Elles jouent un rôle dans leur nutrition hydrique et minérale, notamment phosphatée. Il existe des étapes communes dans la transduction des signaux symbiotiques, impliqués dans ces deux types de symbioses, bactériennes et fongiques, pourtant très différentes. Cette observation a permis d'émettre l'hypothèse de l'existence de signaux fongiques, les facteurs Myc, qui induiraient l'expression du programme de formation de mycorhizes chez les plantes hôtes, comme les facteurs Nod induisent le programme de formation des nodosités.

Un contrat de recherche a été financé par EMD Crop BioSciences (NITRAGIN) de 2006 à 2009 avec pour objectif la purification et l'identification des facteurs Myc par une collaboration interdisciplinaire impliquant les équipes de Jean Dénarié (LIPM), de Guillaume Bécard (LRSV⁷ UPS-CNRS, Toulouse) et Véréna Poinot (IMRCP⁸ UPS-CNRS, Toulouse). Cette collaboration a permis la purification de ces signaux et la détermination de leur structure.

Outputs des recherches

Les Facteurs Nod

La Découverte

Les LCOs comprennent notamment une famille appelée « facteurs Nod », identifiés comme molécules signal pouvant être utilisées à des doses infinitésimales pour augmenter les nodulations des légumineuses, améliorant ainsi le rendement de ces productions. Les cultures concernées sont le soja, le pois, la luzerne et la lentille. L'utilisation des Nod-LCOs a débuté en 2004 pour couvrir dès 2014 plus de trois millions d'ha aux USA, en Argentine et au Brésil, principalement en soja.

Partenariat de recherche permettant des avancées scientifiques et technologiques

La collaboration scientifique et technologique avec NITRAGIN sera fructueuse à compter de 2002. Nous pouvons citer ici les contrats de recherche de 2003 « Optimisation de la production de facteurs Nod par fermentation », « Etude de l'influence des facteurs Nod sur le développement du système racinaire des légumineuses » et de 2007 - 2009 sur « Les facteurs Nod et leur possible utilisation pour les non légumineuses ».

Principales publications

Lerouge, P., Roche, P., Faucher, C., Maillet, F., Truchet, G., Promé, J.C., Denarié, J. (1990). Symbiotic host-specificity of *Rhizobium meliloti* is determined by a sulphated and acylatedglucosamine oligosaccharide signal. *Nature*, 344, 781-784

⁷ Laboratoire de recherche en sciences végétales.

⁸ Laboratoire des interactions moléculaires et réactivité chimique et photochimique.

Roche, P., Debellé, F., Maillet, F., Lerouge, P., Faucher, C., Truchet, G., Denarié, J., Promé, J.C. (1991). Molecular basis of symbiotic host specificity in *Rhizobium meliloti*: nodH and nodPQ genes encode the sulfation of lipooligosaccharide signals. *Cell*, 67, 1131-1143

Ané, J. M., Kiss, G. B., Riely, B. K., Penmetsa, R. V., Oldroyd, G., Ajax, C., Lévy, J., Debellé, F., Baek, J. M., Kalo, P., Rosenberg, C., Roe, B. A., Long, S. R., Dénarié, J., Cook, D. R. (2004). *Medicago truncatula* DMI1 required for bacterial and fungal symbioses in legumes. *Science*, 303, 1364-1367

Brevets

1990 : Methods of producing substances of a lipo-oligosaccharidic nature liable to act as a plant-specific symbiosis signals Denarié J., Faucher C., Lerouge P., Maillet F., Prome J-C, roche Ph, truchet G.

1992 : Wide hosts spectrum rhizobiaceae nodulation signal, Broughton W., Denarié J., Maillet F., Price N., Prome D. et Prome J-C., Relie B., Talmont F.

Découverte des Facteurs Myc

Les facteurs Myc appartiennent à la même famille chimique que les facteurs Nod. Cette découverte constitue une avancée importante dans la compréhension de l'évolution des symbioses végétales. Les chercheurs ont montré que les facteurs Myc sont des signaux symbiotiques qui permettent une stimulation de la formation des mycorhizes, aussi bien chez une légumineuse comme *Medicago truncatula* que chez des espèces appartenant à d'autres familles végétales, comme l'oeillet d'Inde (Asteracées) et la carotte (Apiacées). Les facteurs Myc sont également des régulateurs de croissance qui peuvent induire un accroissement important du système racinaire. Ces facteurs Myc peuvent être utilisés dans de nombreuses cultures telles que les céréales. Ces résultats ont fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2010. Une licence exclusive a été concédée à l'entreprise Novozymes (NITRAGIN), conditionnée à la mise en oeuvre d'efforts de R&D pour la valorisation et la commercialisation de ces composés en France.

Principales publications

Lévy, J., Bres, C., Geurts, R., Chalhoub, B., Kulikova, O., Duc, G., Journet, E.P., Ané, J.M., Lauber, E., Bisseling, T., Dénarié, J., Rosenberg, C., Debellé, F. (2004). A putative Ca²⁺ and calmodulin-dependent protein kinase required for bacterial and fungal symbioses. *Science*, 303, 1361-1364

Maillet, F., Poinot, V., Andre O., Puech-Pages, V., Haouy, A., Gueunier, M., Cromer, L., Giraudet, D., Formey, D., Niebel, A., Andres Martinez E., Driguez, H., Becard, G., Denarié, J. (2011). Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza., *Nature*, 469, 58-63

Brevets

2010 : The invention relates to lipochitooligosaccharides obtainable from arbuscular mycorrhizal fungi, and which are useful for stimulating arbuscular mycorrhizal symbiosis, and lateral root, André O., Bécard G., Crouner L., Denarié J., Gueunier m., Maillet M., Poinot, V.

Partenariat de recherche pérenne

Novozymes a financé un contrat de recherche, d'une durée de 2 ans, sur l'effet des facteurs Myc sur le développement racinaire des céréales (2012-2014). Ce contrat concernait les trois laboratoires qui ont identifié les facteurs Myc (LIPM, LRSV, IMRCP). Novozymes a participé également à PeaMUST (2012-2020), un gros projet de recherche du Programme « Investissement d'Avenir » (PIA) impliquant le LIPME (Julie Cullimore et Sandra Bensmihen) et qui visait à étudier l'effet des facteurs Nod et autres LCOs sur le développement racinaire et la nodulation du pois protéagineux. Novozymes a participé en outre au co-financement de deux doctorants⁹ du LIPME sur des thématiques concernant la signalisation et les mécanismes d'action des LCOs. Ainsi, grâce au soutien de cette entreprise, les recherches ont été poursuivies concernant la découverte des facteurs Myc comme biostimulant pour la croissance des plantes non légumineuses.

Références bibliographiques de travaux financés en partie par Novozymes

Buendia, L., Maillet, F., O'Connor, D., van de-Kerkhove, Q., Danoun, S., Gough, C., Lefebvre, B., and Bensmihen, S. (2019). Lipo-chitooligosaccharides promote lateral root formation and modify auxin homeostasis in *Brachypodium distachyon*. *New Phytologist* **221**, 2190-2202.

Herrbach, V., Chirinos, X., Rengel, D., Agbevenou, K., Vincent, R., Pateyron, S., Huguet, S., Balzergue, S., Pasha, A., Provart, N., Gough, C., and Bensmihen, S. (2017). Nod factors potentiate auxin signaling for transcriptional regulation and lateral root formation in *Medicago truncatula*. *J Exp Bot* **68**, 569-583.

Malkov, N., Fliegmann, J., Rosenberg, C., Gascioli, V., Timmers, A.C.J., Nurisso, A., Cullimore, J., and Bono, J.J. (2016). Molecular basis of lipo-chitooligosaccharide recognition by the lysin motif receptor-like kinase LYR3 in legumes. *Biochemical Journal* **473**, 1369-1378.

Référence bibliographique dans le cadre d'un projet collaboratif issu d'un financement national ANR/ LABEX (laboratoire d'excellence), qui montre la généricité des LCOs dans le monde des champignons

Rush, T.A., Puech-Pagès, V., Bascaules, A., Jargeat, P., Maillet, F., Haouy, A., Maës, A.Q., Carriel, C.C., Khokhani, D., Keller-Pearson, M., Tannous, J., Cope, K.R., Garcia, K., Maeda, J., Johnson, C., Kleven, B., Choudhury, Q.J., Labbé, J., Swift, C., O'Malley, M.A., Bok, J.W., Cottaz, S., Fort, S., Poinot, V., Sussman, M.R., Lefort, C., Nett, J., Keller, N.P., Bécard, G., and Ané, J.M. (2020). Lipo-chitooligosaccharides as regulatory signals of fungal growth and development. *Nature Communications* **11**, 3897.

Circulation des connaissances et intermédiaires

⁹ Les thèses de Violaine Herrbach : « Stimulation du développement des racines latérales par des lipo-chitooligosaccharides (LCO) symbiotiques chez *Medicago truncatula* » (octobre 2010 - octobre 2013) et de Nikita Malkov : « Studies on legume receptors for Nod and Myc symbiotic signals » (Novembre 2011 - 28 Février 2015).

Recherches au champ et commercialisation des LCOs

1993-2000 : la traversée du désert en France et en Europe

Entre 1993, date de dépôt des brevets dits « facteurs Nod » et 2000, aucun industriel, ni institut technique en France et en Europe ne voulait investir dans de la R&D pour déterminer si les facteurs Nod pouvaient avoir un effet agronomique sur les légumineuses. Le marché de l'inoculation des légumineuses en Europe était trop réduit pour justifier un tel investissement.

2000 : la collaboration avec la société NITRAGIN de LIPHATEC : brevets et début de la commercialisation des facteurs Nod

En 2000, lors d'un congrès international sur la fixation de l'azote, en Argentine, Jean Dénarié rencontrait Stew Smith, responsable de la R&D de l'entreprise américaine NITRAGIN, leader mondial pour la production d'inoculants bactériens pour les légumineuses. NITRAGIN faisait partie à l'époque du groupe Français LIPHATEC. Une collaboration a été établie, le LIPM fournissant des facteurs Nod en quantité suffisante pour permettre à NITRAGIN de réaliser de nombreux essais agronomiques aux Etats-Unis, essentiellement sur le soja. Les résultats ont été encourageants et un premier contrat de recherche et une option de licence sur les deux brevets entre INRA-CNRS et LIPHATEC ont été conclus en 2002. La commercialisation des facteurs Nod a débuté en 2004 sur 30 000 ha en Amérique du Nord. Les facteurs Nod étaient utilisés sur 3 millions ha dès 2008.

2006 : Evolution de la société NITRAGIN de LIPHATEC pour devenir la société Novozymes puis Novonesis

LIPHATEC a cédé ensuite NITRAGIN au groupe de chimie EMD. En mars 2006, NITRAGIN a acquis Agribiotics Inc (une PME canadienne qui possède des brevets sur l'effet des LCOs sur les légumineuses et non légumineuses) et est devenu EMD Crop Biosciences qui passera, en février 2011, dans le giron de Novozymes, société danoise de biotechnologie spécialisée dans la production d'enzymes par biotechnologie industrielle. Novozymes a fusionné en 2024 avec Chr. Hansen pour créer Novonesis. Novonesis compte plus de 10 000 employés présents dans plus de 45 pays.¹⁰ Le groupe investit 11% de son chiffre d'affaires¹¹ dans la R&D et détient un portefeuille d'environ 10 000 brevets.

Selon Fortune Business Insights¹², en 2024, Novozymes faisait partie des 10 meilleures entreprises de biostimulants dont 6 sont européennes.

Novozymes commercialise les facteurs Nod et Myc (LCOs) sur les légumineuses et céréales au niveau mondial mais pas en France

Les LCOs sont commercialisés pour les inoculants bactériens destinés aux cultures de légumineuses (soja, haricot, pois, féverole, lentilles, luzerne) aux Etats-Unis, Canada, Argentine, Brésil, Paraguay, Uruguay, Ukraine, Autriche et Italie.

En ce qui concerne les facteurs Myc, ils sont présents dans plusieurs produits commerciaux de la société Novonesis comme Torque, Ratchet, JumpStart LCO et B360, pour le traitement du soja et du maïs. Leur développement et utilisation dans la culture de céréales, notamment le maïs, a fortement augmenté entre 2010 et 2020, pour atteindre environ 17 millions d'hectares, principalement aux Etats-Unis.

¹⁰ https://media.novonesis.com/Novonesis_Annual_Report_2024.pdf

¹¹ En 2024, les ventes totales s'élèvent à 3883,5 Millions €. Les ventes du segment « Agriculture, Energy & Tech » sont de 1397,7 Millions €, en forte croissance par rapport à 2023.

¹² Source: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biostimulants-market-100414>

Paradoxalement, durant cette période, ces biostimulants ne sont pas utilisés en France compte tenu d'une réglementation¹³ contraignante qui dissuade les entreprises d'investir sur le marché français.

Une nouvelle réglementation européenne qui devrait favoriser une large diffusion de la technique

En 2019, l'Union Européenne (UE) a adopté le « Fertilising Product Regulation », règlement UE 2019/1009 (entré en vigueur en 2022) établissant les règles relatives à la mise sur le marché des biostimulants. Ce règlement vise à faciliter la commercialisation des produits de biostimulants au sein de l'UE et à garantir leur sécurité et leur efficacité. Les principaux points à retenir sont les suivants :

- Les biostimulants sont définis comme des substances ou des micro-organismes qui, une fois appliqués sur les plantes ou dans le sol, stimulent les processus naturels des plantes, améliorant ainsi leur nutrition, leur croissance, leur rendement, ou leur résistance aux stress abiotiques.
- Les biostimulants peuvent inclure des extraits de matières naturelles, des protéines et des microorganismes, mais ils ne doivent pas être classés comme des engrais ou des pesticides (cf. Figure 3)
- Pour commercialiser un biostimulant dans l'UE, les entreprises doivent s'assurer que leurs produits respectent les exigences établies, y compris des normes spécifiques sur leur efficacité et leur sécurité.

Selon Novonosis, la nouvelle réglementation européenne sur les biostimulants n'est pas bien adaptée aux produits contenant des molécules de signalisation. Cette réglementation ne tient pas explicitement compte des molécules de signalisation et impose une charge relativement lourde aux coformulants utilisés dans les produits. Les coformulants utilisés dans les biostimulants sont parfois exclus du règlement REACH. Cependant, une fois ajoutés à des produits contenant des engrais, ils doivent soit être soumis au règlement REACH et répondre à des exigences REACH plus strictes, soit, comme certains polymères, être interdits. Cela entraîne des coûts et des retards qui pénalisent l'utilisation de ces produits.

En France, l'ANSES reconnaît l'importance des biostimulants dans le contexte de l'agriculture durable et de l'innovation. Elle pourrait promouvoir des initiatives pour encourager le développement de nouveaux produits, tout en veillant à ce qu'ils respectent les normes de sécurité. L'agence joue un rôle dans la sensibilisation et l'information des agriculteurs sur les biostimulants, leurs avantages et les bonnes pratiques d'utilisation, pour assurer une utilisation appropriée et informée.

Selon Fortune Business Insights, en 2024, la taille du marché mondial des biostimulants était évaluée à 4,03 milliards USD. Ce marché devrait augmenter et passer de 4,47 milliards USD en 2025 à 9,75 milliards USD en 2032. Sur cette période, le taux de croissance annuel composé (TCAC) est estimé à 11,80 %. Il apparaît qu'en 2024, l'Europe a dominé le marché des biostimulants, devant les Etats-Unis, avec une part de marché de 38,95 %. Ceci s'explique par le fait que le cadre réglementaire de l'agriculture dans l'UE est de plus en plus sensible aux préoccupations environnementales et soutient

¹³ <https://www.semae.fr/uploads/guide-etiquetage-semences-matieres-fertilisantes-biostimulants-202105.pdf>
: Dans la catégorie MFSC (« matières fertilisantes et supports de culture ») qui nécessite une autorisation de mise en marché (AMM) délivrée par l'ANSES. Selon les normes : NF U42-002-1, NF U42-002-2, NF U42-003-1, NF U42-003-2, NF U42-004, NF U44-001, NF U44-051, NF U44-203 en référence par la norme NF U 44-204 d'application obligatoire et hors liste des SNUB (arrêté n°2016-532 du 27 avril 2016). Evaluation par l'ANSES en tant qu'additif (3 types : réparations microbiennes, substances humiques et stimulateurs de croissance et/ou développement des plantes) avec AMM pour cet usage en mélange.

le développement des biostimulants dont le marché atteint 1,57 milliards USD en 2024 dont 12,16% sont représentés par des biostimulants de type microbiens. Dans ce marché mondial en pleine expansion, l'Europe devrait continuer à détenir la part de marché la plus élevée (Cf. Figure 4).

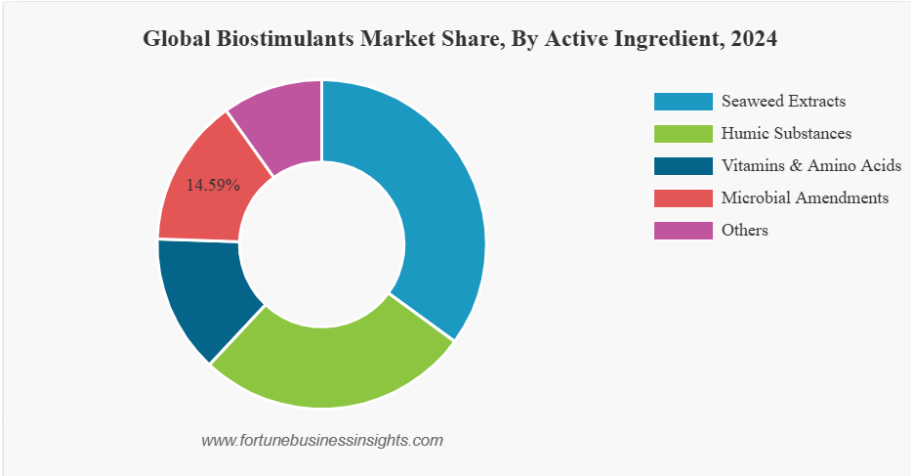


Figure 3 : En 2024, le marché global des biostimulants montre que 14,59% est occupé par les biostimulants de type microbiens (en rouge). La plus grosse part du marché est occupée par les extraits algues (en bleu turquoise) suivi par les acides humiques (en vert), les vitamines et les acides aminés (bleu foncé) et d'autres substances (en rose), (Source : WWWfortunebusinessinsights.com).

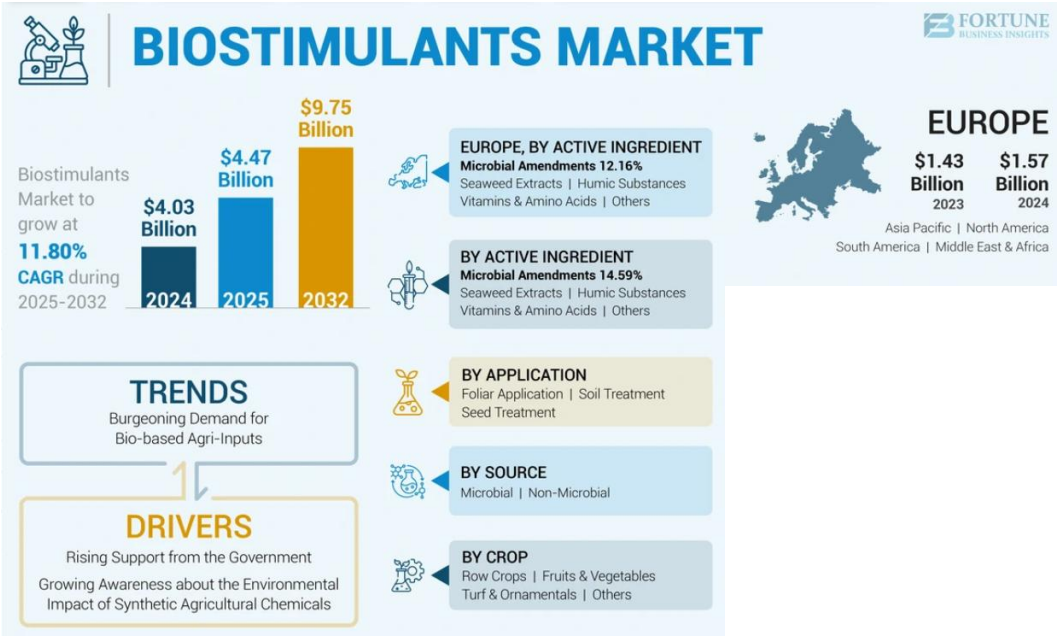


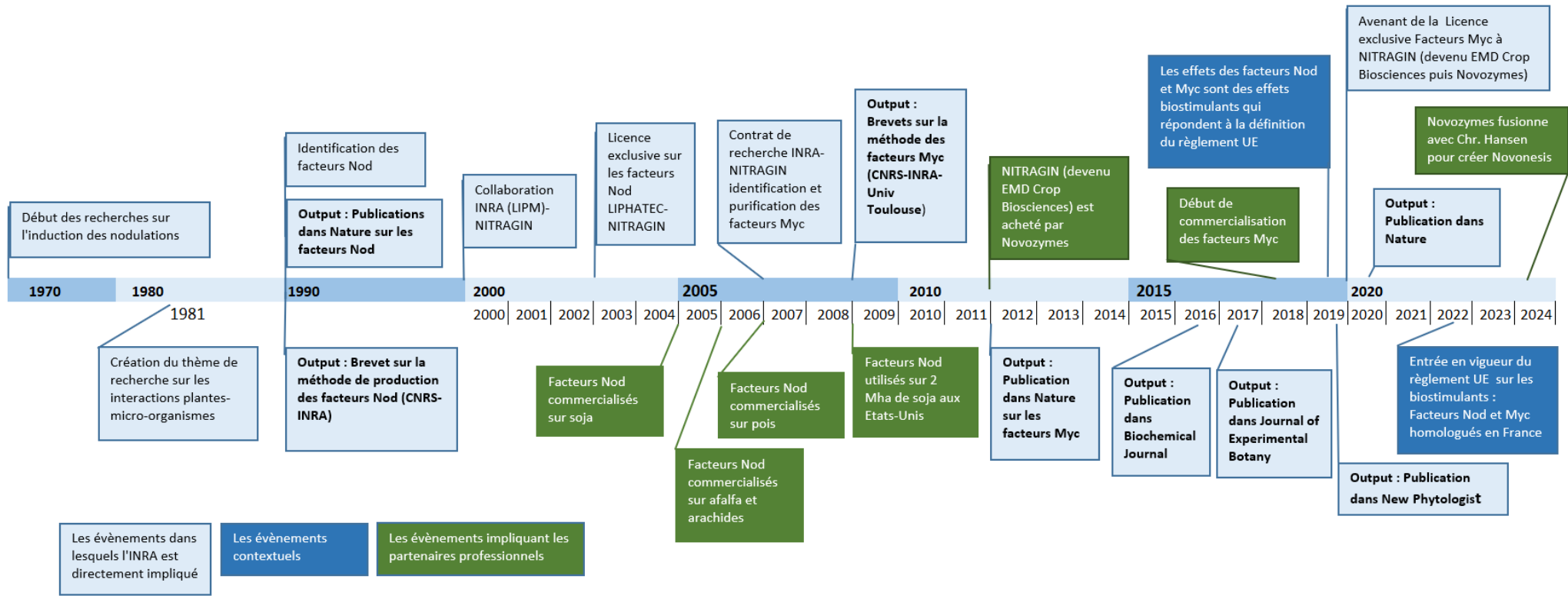
Figure 4 : Présentation du marché global des biostimulants en 2024, (Source : WWWfortunebusinessinsights.com).

Chronologie

Date	Evénement
1970	Début des recherches sur l'induction des nodulations
1981	Création du thème de recherche sur les interactions plantes-microorganismes
1990	Identification des facteurs Nod
1990	Premier output : Publication dans Nature sur les facteurs Nod (Lerouge <i>et al.</i> , 1990)
1990	Premier output : Brevet sur la méthode de production des facteurs Nod (CBRS-INRA): Substances de structure lipo-oligosaccharidique propres à jouer le rôle de signaux symbiotiques plantes-spécifiques, leurs procédés de production et leurs applications. FR90/04764 du 6/04/1990 (Denarié <i>et al.</i> , 1990) Europe, USA, (Australie), (Canada), (Japon) <u>Famille échue en 2011</u>
1992	Premier output : Brevet Facteurs Nod - Signaux de nodulation de <i>Rhizobiaceae</i> à large spectre d'hôte FR92/07958 du 29/06/1992 (Broughton <i>et al.</i> 1992) USA, Europe, Australie <u>Famille échue en 2013</u>
2000	Collaboration INRA (LIPM)-NITRAGIN
2002	Premier impact : Licence exclusive sur les facteurs Nod à LIPHATEC-NITRAGIN Accords de licence (échus) : 03008LI avec NITRAGIN puis EMD Crop Biosciences puis Novozymes
2004	Facteurs Nod commercialisés et utilisés sur soja
2005	Facteurs Nod commercialisés et utilisés sur alfafa et arachides
2006	Facteurs Nod commercialisés et utilisés sur pois
2006	Facteurs Nod utilisés sur 2 Millions d'ha de soja aux Etats-Unis
2009	Brevet sur la méthode de production des facteurs Myc (CNRS-INRA-Université de Toulouse) (André <i>et al.</i> , 2010) <u>Brevet en vigueur en 2024</u> : Afrique du Sud ZA201102754, délivré en 2011 Argentine AR079193, délivré le 30/06/2021 Australie AU2009309337, délivré en 2016 Brésil BRPI0919949, délivré en 2018 Canada CA2740082, délivré Europe EP3210463, délivré (13 pays : AT BE CH DE DK ES FR GB IT NL PL PT TR). USA US11,008,356 et US9,241,454 (délivrés)

	<p>Mexique MX323550, délivré Russie RU2539028, délivré Ukraine UA107448, délivré Asie : abandon demande en Inde (IN) en 2021 ; abandon en Chine (CN) en 2015 <u>Arrivera à échéance en 2029 sauf USA 2030</u></p>
2010	Licence Facteurs Myc EMD Crop Biosciences en 2010 sur brevet et Savoir-faire
2011	NITRAGIN (devenu EMD Crop Biosciences) est acheté par Novozymes
2011	Publication dans Nature sur les facteurs Myc (Maillet <i>et al.</i> , 2011)
2016	Publication dans Biochemical Journal (Malkov <i>et al.</i> , 2016)
2017	Publication dans Journal of Experimental Botany (Herrbach <i>et al.</i> , 2017)
2018	Début de commercialisation des facteurs Myc par Novozymes
2019	Publication dans New Phytologist (Buendia <i>et al.</i> , 2019)
2019	<p>Les effets des facteurs Nod et Myc sont des effets biostimulants qui répondent à la définition du règlement UE 2019/1009 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE, modifiant les règlements (CE) n°1069/2009 et (CE) n°1107/2009 et abrogeant le règlement (CE) n°2003/2003. <u>Entrée en vigueur en 2022</u></p>
2020	Licence exclusive facteurs Myc EMD Crop Biosciences en 2010 sur brevet et Savoir-faire puis Novozymes (rachat d'EMD), avenant 2 signé en 2020
2020	Publication dans Nature Communications (Rush <i>et al.</i> , 2020)
2024	Novozymes a fusionné avec Chr. Hansen pour créer Novonesis

Frise chronologique



Récapitulatif des 5 partenaires principaux (hors-INRAE) associés

Nom du partenaire associé aux recherches	Type (académique, privé, instance publique, institut technique)	Connaissances apportées disciplines, compétences spécifiques	Moyens apportés (financiers, infrastructures..)	A participé depuis le début des recherches?
CRBGC, CNRS et LRSV Toulouse	Académique	Biologie des plantes et des interactions plante-microorganismes	Recherche en laboratoire	oui
LIPHATEC-NITROGIN, devenu EMD Crops Biosciences puis Novozymes et Novonesis	Privé	Leader mondial pour la production des inoculants bactériens pour les légumineuses depuis plus d'un siècle	Essais réels au champ et financement de contrats de recherche	non

Impacts

Dans un premier temps, à partir de 2004, les facteurs Nod ont été utilisés pour la culture de soja puis sur d'autres légumineuses (luzerne et arachide) aux Etats-Unis (Impact 1). C'est ensuite, à partir des découvertes des facteurs Myc en 2010 que d'autres cultures ont bénéficié de l'utilisation des LCOs, notamment le maïs (Impact 2).

Impacts 1

Économique

Les facteurs Nod permettent un gain de rendement du soja de 3% environ. Ils ont été utilisés sur une surface de 6 millions d'ha environ aux Etats-Unis. Le surplus économique attribuable à leur utilisation, entre 2004 et 2022, est de l'ordre du milliard d'euros.

Environnemental

Les LCOs sont des molécules signal naturelles, biodégradables, qui sont actives à de très faibles concentrations (de l'ordre du picomolaire) pour la stimulation du développement racinaire et la nodulation. C'est pour cette raison qu'elles sont utilisées à des doses très faibles de l'ordre d'un dixième de milligramme par hectare. Premier exemple : la recommandation de Novozymes pour le taux d'application du produit TORQUE IF dans le sol lors des plantations du maïs ou du soja est de

29,56 mL pour 4047 m² (0,4 ha)¹⁴. Second exemple : le produit B360 contient 1 x 10⁻⁷% lipochitooligosaccharides¹⁵.

Ces composés sont utilisés pour stimuler le développement racinaire et donc permettre une meilleure exploitation des ressources hydrominérales et un meilleur ancrage au sol, ainsi que pour stimuler la formation des nodosités fixatrices d'azote et donc contribuer à une diminution de la consommation des engrais azotés notamment pour la culture des légumineuses. Pour un meilleur rendement (environ de 3% pour le soja), très peu de principe actif, naturel et biodégradable, est disséminé dans l'environnement.

Politique

RAS

Sanitaire

RAS

Social, territorial

RAS

Impacts 2

Les facteurs Myc ont des effets positifs sur la croissance de nombreuses espèces. Les tests réalisés par Novozymes à partir de ses différents produits commerciaux à base de LCOs conduisent à estimer des gains de rendement relativement élevés pour le maïs, le blé, le riz, le coton, le piment et la tomate.

Le potentiel d'utilisation est donc très élevé. On se limite dans ce qui suit aux utilisations actuelles sur le maïs.

Économique

Sur la base des ventes de facteurs Myc par Novozymes au cours des quatre dernières années (2020-2024) on peut estimer que ce facteur est utilisé sur environ 17 millions d'hectares par an, principalement le maïs. Pour cette culture, l'application foliaire du facteur Myc permet une augmentation de rendement de 3,2 qx/ha et son application sur le sol favorise une augmentation de 4,2 qx/ha.

Depuis 2022, les pays concernés sont principalement : les Etats-Unis (environ 60%), le Canada, l'Argentine, l'Afrique du Sud et en Europe : la Belgique, la France, l'Ukraine....

Sur ces bases, on peut estimer que le surplus économique attribuable à cette technologie est compris entre 5 et 10 milliards € entre 2016 et 2024.

Environnemental

Comme pour les facteurs Nod, les facteurs Myc sont utilisés pour stimuler le développement racinaire et donc permettre une meilleure exploitation des ressources hydrominérales et un meilleur

¹⁴ <https://www.novonesis.com/en/biosolutions/animal-and-plant/plant/Torque® IF>

¹⁵ <https://www.novonesis.com/en/biosolutions/animal-and-plant/plant/corn/b360>

ancrage au sol, ainsi que pour la mise en place de la mycorhization et donc contribuer à une diminution de la consommation des engrais azotés notamment pour la culture des céréales.

Politique

RAS

Sanitaire

RAS

Social, territorial

RAS

Impacts généralisés

RAS

Impacts potentiels

Social, territorial

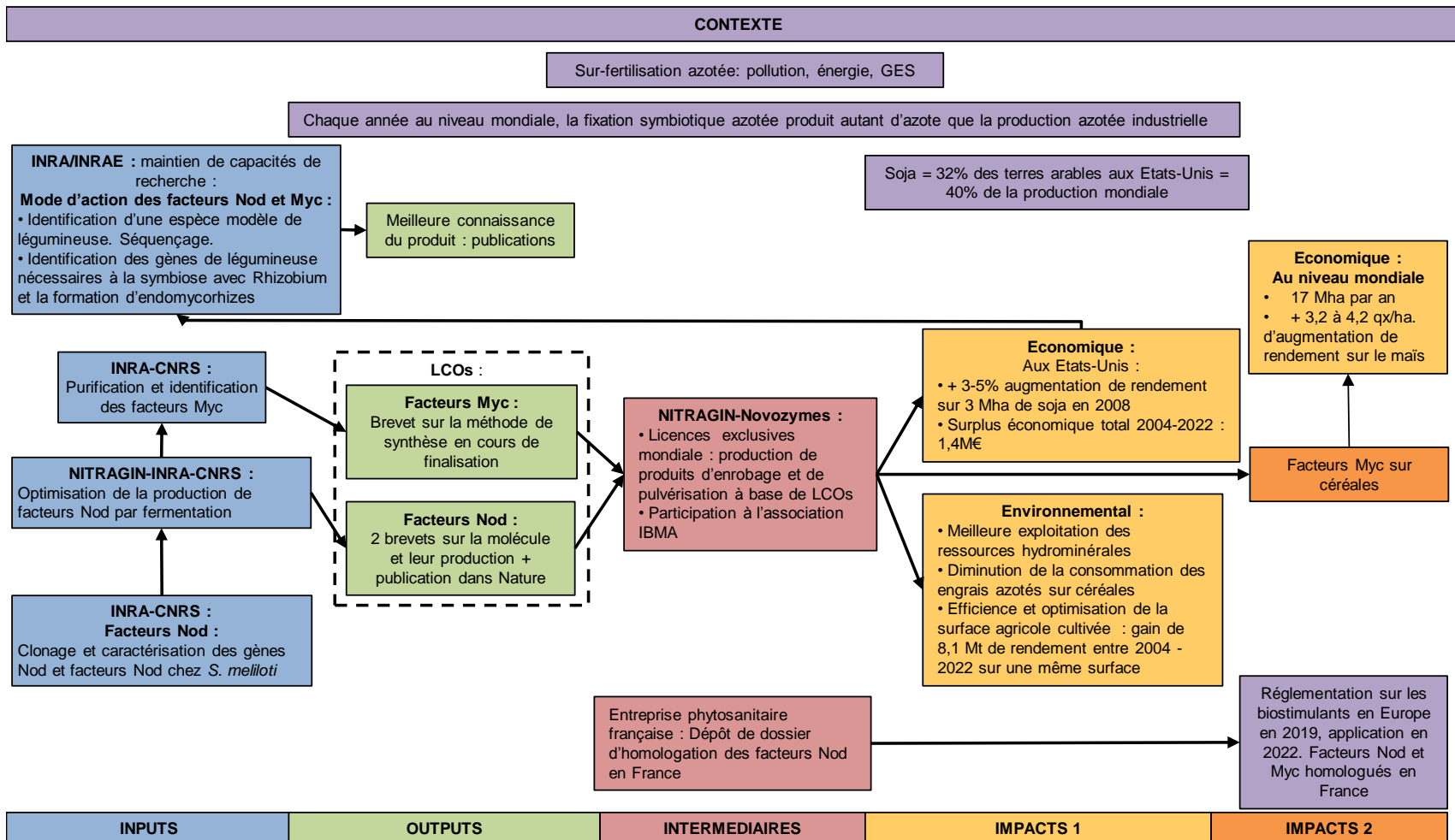
Il est peut-être possible d'aller vers une réduction de la dépendance aux importations des légumineuses en France/Europe si le cadre réglementaire évolue en permettant un développement des surfaces de légumineuses à terme.

Environnemental

Les LCOs principalement utilisés dans le traitement de sol sont également employés pour des applications foliaires dans le but d'améliorer la santé des plantes, ce qui conduirait à diminuer le nombre de pulvérisations de pesticides.

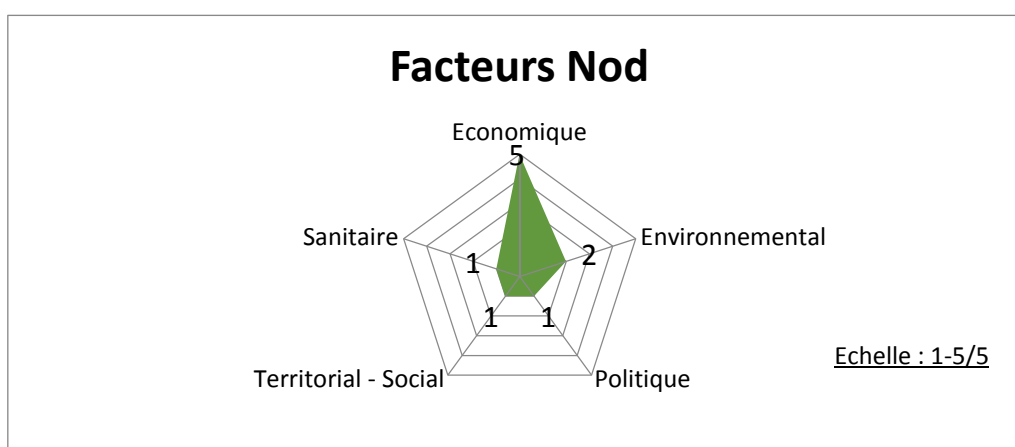
Chemin d'impact

Les



Impacts en résumé

Dimension d'impact	Notation de l'importance de l'impact : de 1 à 5 ou faible, moyen, fort	Résumé de chacun des impacts
Economique	5/5	<ul style="list-style-type: none"> • +3 à 5% d'augmentation de rendement sur 3 Mha de soja aux Etats-Unis en 2008 • Surplus économique totale de 1,4 M d'euros entre 2004 et 2022 liés au facteurs Nod • 17 Mha par an concernent les facteurs Myc • +3,2 à 4,2 quintaux/ha d'augmentation de rendement du maïs
Environnemental	2/5	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure exploitation des ressources hydrominérales • Diminution de la consommation des engrais azotés sur céréales • Efficience et optimisation de la surface agricole cultivée : gain de 8,1 Mt de rendement entre 2004-2022 sur une même surface
Sanitaire	1/5	
Territorial-social	1/5	
Politique	1/5	



Source des données – Références

Liste des entretiens réalisés (personnel INRAE + acteurs socio-économiques) :

Avant 2014 :

Jean Dénarié : Directeur de recherches retraité INRA.

Stew Smith : ex-PDG EMD Crop Sciences, Conseil scientifique de Novozyme.

2025 :

Sandra Bensmihen : Directrice de recherche CNRS, Equipe SMS (Mécanismes de la signalisation symbiotique) - LIPME - Laboratoire des interactions plantes-microbes-environnement, INRAE.

Morten Jensen : Senior IP Partnering & Technology Manager, Novozymes.

Michael Barnhart : Scientific, Novozymes.

Cécilia Multeau : Département SPE (Santé des plantes et Environnement), chargée de partenariat et d'innovation, INRAE.

Ophélie Jaffrennou : Département SPE (Santé des plantes et Environnement), chargée de partenariat et d'innovation, INRAE.

Alix Malatray : INRAE Transfert.

Pascale Barbier : Ingénieure Propriété Industrielle, DPTI (Direction du partenariat et transfert pour l'innovation), INRAE.

Nicolas Thevenin : Chargé d'études réglementation des matières fertilisantes et des supports de culture, DGAL-Direction Générale de l'Alimentation au Ministère en charge de l'agriculture.

Liste des documents et sites web consultés

Avant 2014 :

ASIRPA Facteurs Nod et Myc : des molécules signal aux champs pour un grain de productivité des cultures, Mars 2014.

Gough C., *Medicago truncatula*, un modèle pour l'étude des endosymbioses racinaires, Biofutur, Avril 2009, n°298, pp30-33.

Liegeois E., An european legislation on biostimulants : where do we stand?, The 1st World congress on the use of biostimulants in agriculture, Strasbourg, 26-29 Novembre 2012.

2025 :

Bensmihen, S. Comment des signaux bactériens permettent la communication entre plantes et bactéries et stimulent le développement des plantes, Journées du Patrimoine, Montauban, 2024.

Cornu, P., Valceschini, E., Maeght-Bournay, O. (2018). *L'histoire de l'Inra, entre science et politique*. Editions Quae, 464 p., 2018, 978-2-7592-2637-5. [hal-02791039](https://hal.inrae.fr/hal-02791039)

INRA (1986). Quelques thèmes de recherche sur les biotechnologies végétales. Cité par Cornu et al., p.262.

Pellissier, F. Europeanization of public policies. A long term view on pesticides policy in France & the EU. Sociological Reflections on the Future of Agri-food Systems: Confronting 'models', January 28th, 2015.

Schneider, A., Huyghe, C. (2015). Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires. Éditions Quæ durables
https://www.terresinovia.fr/documents/20126/454429/legumineuses_systemes_agricoles_alimentaires_durables_2015_web.pdf

Sites web

Avant 2014

USDA : <http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/Acre/Acre-06-28-2013.pdf>

Production de soja :

http://www.nationmaster.com/red/graph/agr_pro_soy-agriculture-productionsoybean&b_map=1

Production de soja et maïs :

<http://cornandsoybeandigest.com/blog/september-2013-usda-crop-production-summary>

2025

Data.gouv.fr : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/surface-de-cultures-en-legumineuses-total-proteagineux-et-legumes-secs-soja-prairies-artificielles/>

Fortune Business Insights : <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biostimulants-market-100414>

Indexmundi-country facts

Novonosis : <https://www.novonosis.com/en/campaigns/are-you-getting-most-out-every-acre>

Novonosis rapport 2024 : https://media.novonosis.com/Novonosis_Annual_Report_2024.pdf

<https://hal.science/hal-01286499>:

Novonosis produits TORQUE IF, RATCHET, B360 :

[https://www.novozymes.com/en/news/Get_crops_off_to_a_strong_start_with_Torque® IF, Ratchet® from Novozymes | Novozymes](https://www.novozymes.com/en/news/Get_crops_off_to_a_strong_start_with_Torque_IF,_Ratchet_from_Novozymes_|_Novozymes)

[https://www.novonosis.com/en/biosolutions/animal-and-plant/plant/Torque® IF](https://www.novonosis.com/en/biosolutions/animal-and-plant/plant/Torque®_IF)

<https://www.novonosis.com/en/biosolutions/animal-and-plant/plant/corn/b360>

Portrait Patrick Rouge : <https://www.fraib.fr/la-federation/portraits/patrice-lerouge-a-la-decouverte-des-facteurs-nod>

Portrait Fabienne Maillet : <https://www.fraib.fr/la-federation/portraits/fabienne-maillet-a-la-decouverte-des-facteurs-nod-une-epopee-passionnante>

Projet PeaMust : <https://www.inrae-transfert.fr/fr/actualites/102-8-projets/304-peamust>

<file:///C:/Users/vmoliner/Downloads/AGRI24-F11.pdf>

Réglementation concernant les biostimulants

<https://www.semae.fr/uploads/guide-etiquetage-semences-matieres-fertilisantes-biostimulants-202105.pdf>

Statistique FAO : https://www.fao.org/faostat/fr/#rankings/countries_by_commodity

Cette étude de cas a été réalisée par le département de recherche **SPE (Santé des Plantes et Environnement)** selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

Pour en savoir plus sur la méthode : <https://www6.inrae.fr/asirpa/>

Auteurs principaux : Valérie Molinéro-Demilly, Sandra Bensmihen, Pierre Benoit Joly.

Photo de couverture : crédit Sandra Bensmihen, INRAE.

Ce document est sous licence Creative Commons BY NC SA : Attribution – Utilisation non commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions.



> Pour citer ce document : Molinéro-Demilly,V., Bensmihen,S., Joly, P.B., *Facteurs Nod et Myc : des molécules signal aux champs pour un gain de productivité des cultures*, Rapport ASIRPA, 2025, INRAE, 23 pages.

hal-05345034v1

> Contact : asirpa@inrae.fr