

ASIRPA

Analyse Socio-économique des Impacts de la
Recherche Publique Agricole

Facteurs Nod et Myc : des molécules signal aux champs pour un gain de productivité des cultures

Executive Summary

Mars 2014
Révision Juillet 2014

Des recherches sur la compréhension des mécanismes de fixation de l'azote chez les légumineuses menées par des équipes INRA-CNRS ont conduit à la caractérisation de molécules signal de la symbiose racinaire, les facteurs Nod, molécules lipochito-oligosaccharidiques naturelles. Les Fac Nod sont donc des régulateurs de croissance et des stimulateurs du développement racinaire. La production et l'application de ces molécules ont donc été brevetées, permettant ainsi leur fabrication et commercialisation par une entreprise. Elles sont ainsi accessibles aux cultivateurs de légumineuses avec un gain de 3 % observé sur le rendement des cultures de soja.

Contexte

La fixation de l'azote par les plantes en symbiose avec des bactéries. Les plantes ne peuvent assimiler directement l'azote moléculaire (N_2), constituant majeur de l'atmosphère. Aussi leur fournit-on l'azote nécessaire à leur croissance sous forme d'engrais constitués de nitrates ou d'ammoniac. Pour limiter cette fertilisation azotée, consommatrice d'énergie et source de pollution pour les eaux, les chercheurs de l'INRA 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 qui est 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. A l'échelon planétaire, les symbioses Rhizobium-légumineuses produisent autant d'ammoniac que toute l'industrie des engrais.



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 60 vers les années 90, l'utilisation de méthodes de fertilisation raisonnée a permis depuis de réduire la progression de ces apports.

L'azote sous forme de nitrates est de loin l'engrais le plus souvent cité lors de la critique de l'utilisation des engrais industriels. En effet, cet azote facilement assimilable par les plantes est aussi celui qui est le plus facilement lessivable dans les sols, et c'est celui qui est le plus souvent retrouvé dans les eaux de ruissellement et les nappes souterraines. Il cause l'eutrophisation des lacs, réservoirs et mares et provoque le développement des algues vertes, quand il ne reste pas sous terre en rendant les sources impropres à la consommation. Les nitrates peuvent enfin être entraînés jusqu'à la mer.

Les légumineuses : plantes fixatrices d'azote en symbiose. Les légumineuses ont été les premières à être domestiquées, avec des céréales, parfois dès le néolithique : pois, fève et lentilles dans le croissant fertile au Proche-Orient avec le blé et l'orge ; haricot et lupin en Amérique centrale et australe avec le maïs ; soja et 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...) consommées directement par pâturage des prairies ou récoltées sous forme de fourrage, et celles cultivées pour leurs graines (soja, pois, féverole, lupin, haricot) appelées couramment protéagineux.

La culture de ces légumineuses présente de multiples avantages environnementaux. (i) Elles contribuent à protéger la biodiversité, en fournissant habitats et sources de protéines, elles favorisent la survie de la faune dont les insectes pollinisateurs (la majorité des légumineuses sont des plantes mellifères). (ii) Leur fixation de l'azote 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. (iii) Les légumineuses constituent des engrais verts : elles fertilisent naturellement les sols et sont très utilisées dans la rotation des cultures. (iv) ces plantes sont riches en protéines qui sont utilisées pour l'alimentation humaine et animale. C'est ainsi qu'il faut 5 à 10 fois plus de surfaces agricoles pour produire la même quantité de protéines sous forme animale que sous forme végétale. La consommation humaine de protéines végétales permet donc de réaliser des économies de surfaces cultivées et d'énergie. 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 USA. 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. Il faut noter que 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. En France en 2007, la culture de légumineuses ne représente que 632 000 ha soit 3% des terres arables, contre 13% au Canada, 32% aux USA et 44% au Brésil. La culture du soja représente environ 77,7 millions d'acres (31,4Mha) aux USA pour une production totale d'environ 80 millions de tonnes (<http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/Acre/Acre-06-28-2013.pdf>) soit prêt de 40% de la production mondiale, suivent le Brésil avec environ 56 millions de tonnes et l'Argentine avec environ 40 millions de tonnes (http://www.nationmaster.com/red/graph/agr_pro_soy-agriculture-production-soybean&b_map=1). Ces trois pays représentent 82% de la production mondiale de soja. Le rendement de la production de soja aux USA en 2013 se situe entre 30 et 48 bushels/acres (2.5t/ha) (<http://cornandsoybeandigest.com/blog/september-2013-usda-crop-production-summary>). En juin 2013, le court moyen d'échange du soja aux USA se situe à 560\$/Tonne. Ainsi, toute augmentation des rendements des cultures de légumineuses est économiquement important en termes de productivité/ha.

Plusieurs actions peuvent augmenter la productivité des cultures : la sélection variétale, l'apport en intrants, ou l'augmentation de performance par stimulation de l'absorption des nutriments par les plantes. Vu la croissance exponentielle de la demande alimentaire humaine, il est important de développer des solutions sur un court ou moyen terme. Ainsi, les substances dites « biostimulants », agissant sur le troisième levier d'action, sont une solution très recherchée par les firmes et les agriculteurs.

Cependant, pour leur utilisation une réglementation est en cours d'élaboration au niveau notamment européen. En effet, les tests d'évaluation de l'efficacité, des risques environnementaux et des utilisateurs des biostimulants ne peuvent suivre la réglementation des engrais ou produits phytopharmaceutiques.

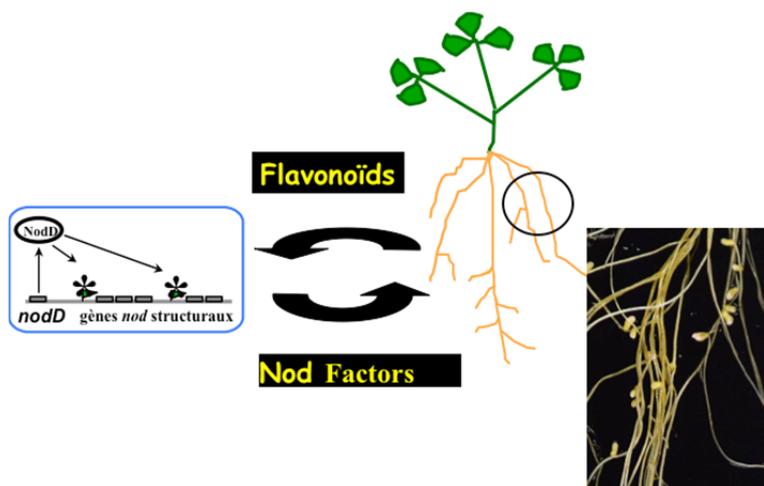
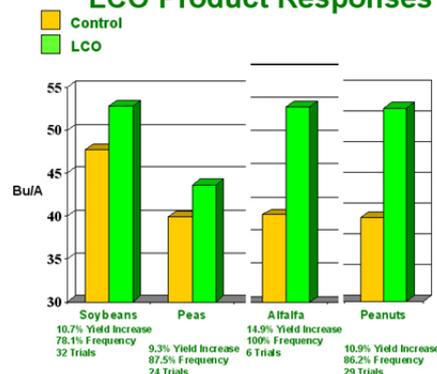
Inputs et situation productive

Les recherches concernant la fixation biologique de l'azote existent à l'INRA depuis plusieurs décennies avec des approches différentes suivant les équipes. 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 sélectionnées de Rhizobium, pour le soja, la luzerne et le lupin. Jean Dénarié, à la Station de Pathologie Végétale de Versailles, a souhaité utiliser les progrès de la génétique moléculaire pour étudier la symbiose des légumineuses. C'est ainsi qu'avec ses collaborateurs, depuis les années 70, ils se sont intéressés à la compréhension des 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. Puis en 1981, la direction générale de l'INRA (J. Poly) et la direction des Sciences de la Vie du CNRS (A. Berkaloff) ont souhaité développer la thématique de recherche « interactions plantes-microorganismes » et ont créé à Toulouse une unité mixte de recherche, dirigée par P. Boistard, qui est le LIPM aujourd'hui. L'équipe de J. 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 plasmide¹ de très grande taille (mégaplasmide). 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 G. Truchet (LIPM, INRA-CNRS Toulouse) et J.-C. Promé (CRBGC, CNRS Toulouse) a montré que ces gènes *Nod* contrôlent 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.

LCO Product Responses



Des substitutions variées du squelette de base de ces molécules leur confèrent leur spécificité, impliquée dans la reconnaissance des plantes-hôtes. Les facteurs Nod ont une grande activité biologique. Sur les racines de Légumineuses-hôtes, à des concentrations de l'ordre du nano- au picomolaire, 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. 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 une PME américaine NITRAGIN, leader mondial pour la production 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 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 1)

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 importants avec l'INRA et le CNRS pour des travaux réalisés au LIPM. NITRAGIN Inc. a ensuite été achetée par

¹ Plasmide : petite chaîne d'ADN bactérien autonome et susceptible d'être transmise entre bactéries de la même espèce ou non

EMD en 2006 et par 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.

Les facteurs Myc :

Les endomycorhizes à arbuscules sont des symbioses fongiques très répandues dans le monde végétal (plus de 80% des espèces végétales) et elles jouent un rôle important 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 BioScience (Nitragin) de 2006 à 2009 avec pour objectif la purification et l'identification des facteurs MYC par une collaboration interdisciplinaire impliquant les équipes de J. Dénarié (LIPM), de Guillaume Bécard (LRSV UPS-CNRS, Toulouse) et Véréna Poinot (IMRCP UPS-CNRS, Toulouse). Cette collaboration a permis la purification de ces signaux et la détermination de leur structure.

Outputs

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, l'alfalfa et les lentilles. L'utilisation des LCO a débuté en 2004 pour couvrir en 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 l'entreprise 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 : un contrat de recherche sur « les Facteurs Nod et leur possible utilisation pour les non légumineuses ».

Publications :

LEROUGE P., ROCHE P., FAUCHER C., MAILLET F., TRUCHET G., PROMÉ J.C., DÉNARIÉ J.
Symbiotic host-specificity of *Rhizobium meliloti* is determined by a sulphated and acylated glucosamine oligosaccharide signal. *Nature*, 344, 781-784 (1990)

ROCHE P., DEBELLÉ F., MAILLET F., LEROUGE P., FAUCHER C., TRUCHET G., DÉNARIÉ J., PROMÉ J.C. Molecular basis of symbiotic host specificity in *Rhizobium meliloti*: nodH and nodPQ genes encode the sulfation of lipooligosaccharide signals. *Notice biographique de Jean Dénarié, Membre de l'Académie des sciences Cell*, 67, 1131-1143 (1991)

ANÉ J. M., KISS G. B., RIELY B. K., PENMETS A. R. V., OLDROYD G., AYAX C., LÉVY J., DEBELLÉ F., BAEK J. M., KALO P., ROSENBERG C., ROE B. A., LONG S. R., DÉNARIÉ J., COOK D. R. *Medicago truncatula* DMI1 required for bacterial and fungal symbioses in legumes. *Science*, 303, 1364-1367 (2004)

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 hots spectrum rhizobiacee 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, ce sont des lipochito-oligosaccharides. 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 trunculata* que chez des espèces appartenant à d'autres familles végétales, comme l'œillet 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. Il est attendu que ces facteurs MYC puissent être utilisés dans de nombreuses cultures telles que les céréales.

Ces résultats ont fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2010, et une licence exclusive a été cédée à l'entreprise Novozymes (Nitragin), conditionnée à la mise en œuvre d'efforts de R&D pour la valorisation et la commercialisation de ces composés en France.

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., A putative Ca²⁺ and calmodulin-dependent protein kinase required for bacterial and fungal symbioses. *Science*, 303, 1361-1364 (2004)

MAILLET F., POINSOT 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., DENARIE J. Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza., *Nature*, 469, 58-63 (2011)

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., Poinsot, V.

Nous pouvons noter qu'en termes académiques cette recherche a permis l'identification d'une plante modèle : *Medicago truncatula*².

Partenariat de recherche pérenne

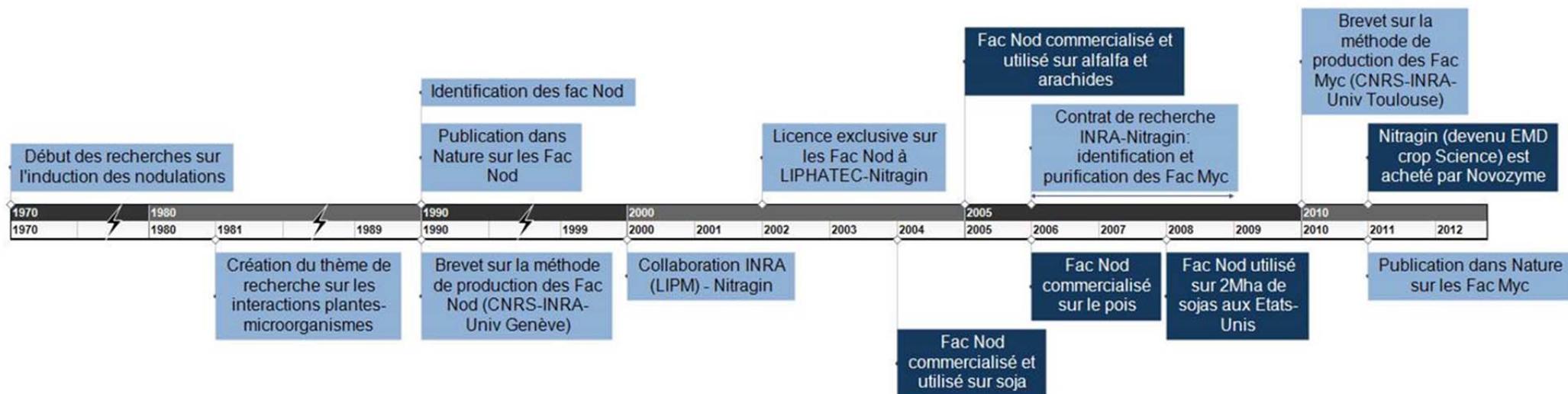
Novozymes finance actuellement un contrat de recherche sur l'effet des facteurs Myc sur le développement racinaire des céréales. Ce contrat concerne les trois laboratoires qui ont identifié les facteurs Myc (LIPM, RSLV, IM-RCP).

² Cette espèce a été adoptée depuis comme modèle par la plupart des laboratoires intéressés par les légumineuses en Europe et aux Etats-Unis, permettant ainsi des gains dans la transposition des résultats de recherche vers leur utilisation pour des plantes d'intérêt agronomique.

Novozymes participe également à PeaMust un très gros programme de recherche financé par l'ANR, dans un projet impliquant le LIPM (J. Cullimore) qui vise à étudier l'effet des facteurs Nod et autres LCOs sur le développement racinaire et la nodulation du pois protéagineux.

Novozymes participe en outre au co-financement de deux doctorants du LIPM sur des thématiques concernant la signalisation et les mécanismes d'action des LCOs. Nous pouvons noter que grâce à ce soutien de l'entreprise les recherches ont été poursuivies donnant la découverte des facteurs Myc comme biostimulant pour la croissance des plantes non légumineuses.

Chronologie



Légende

- Les événements dans lesquels l'INRA est directement impliqué
- Les événements contextuels

Circulation des connaissances et intermédiaires

Depuis 1993, date de dépôt des brevets dits « Facteurs Nod » jusqu'en 2000, une longue traversée du désert. 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 étant trop réduit pour justifier un tel investissement.

En 2000, lors d'un congrès international sur la fixation de l'azote, en Argentine, J. Dénarié (LIPM) a rencontré Stew Smith responsable de la R&D dans 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 USA, 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 fabrication des facteurs Nod est assurée par l'entreprise, les produits étant distribués par les réseaux de distributeurs habituels d'intrants des cultures. L'utilisation et la commercialisation des Fac Nod a débuté en 2004 sur 30000ha en Amérique du Nord.

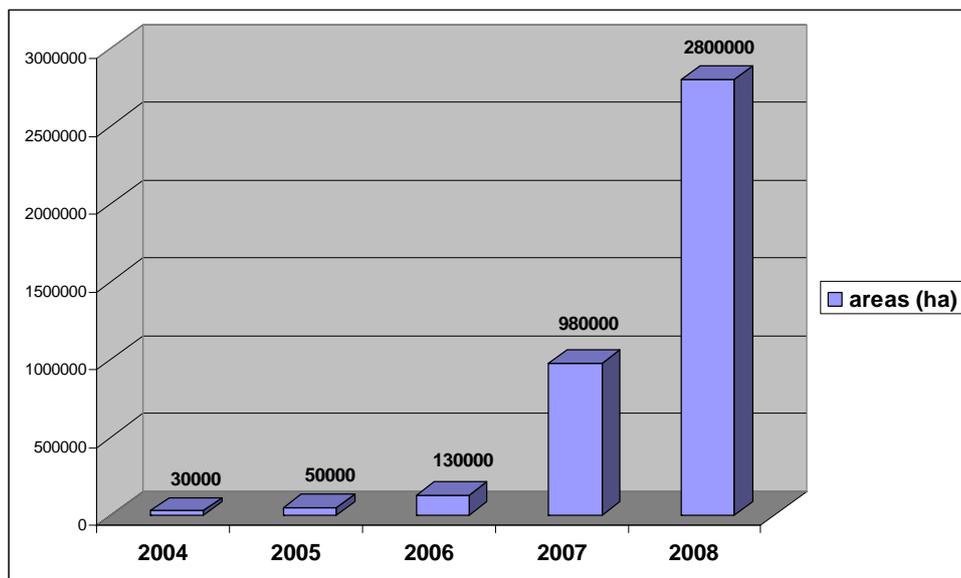


Figure 2 : Surfaces de légumineuses utilisant les fac Nod.

LIPHATEC a cédé ensuite NITRAGIN au groupe de chimie EMD et 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 devient EMD CropScience qui passera, en février 2011, dans le giron de Novozymes, société danoise de biotechnologie avec un fort accent sur la production d'enzymes par biotechnologie au niveau industriel. Novozymes a un fort potentiel de R&D et détient plus de 6000 brevets. Les 5800 employés de Novozymes travaillent dans la recherche, la production et la commercialisation à travers le monde. La filiale BioAg, spécialisée dans les produits destinés à l'agriculture, donne l'image d'une entreprise engagée dans la production de technologies visant au développement d'une agriculture durable. Parmi plus de 700 produits issus de la biotechnologie vendus dans 130 pays, les LCO représentent une partie non négligeable (6%) du chiffre d'affaires global de la firme.

Notamment, les LCOs participent au développement de la société Novozymes BioAg dans les secteurs de l'agro-nutrition ou de la protection des plantes. Les LCOs sont commercialisés pour les inoculants bactériens destinés aux cultures de légumineuses comme le soja, haricots, pois, féverole, lentilles, luzerne, aux USA, Canada, Argentine, Brésil, Paraguay, Uruguay, Ukraine, Autriche et Italie. A ce jour la France n'a pas encore homologué les LCOs. Les LCOs sont également utilisés, sans inoculant bactérien, pour le traitement des semences et la pulvérisation foliaire du soja mais aussi de non-légumineuses comme le maïs.

La réglementation française demande notamment de faire des tests nécessitant des quantités de LCOs démesurées par rapport à la réalité de leur utilisation. La réglementation Européenne tant attendue en 2015 sur les biostimulants pourrait peut-être débloquer la situation afin que les agriculteurs français puissent bénéficier de la technologie LCO. Les entreprises telles que Novozymes, productrices de biostimulants, apportent leur expertise et participent au lobbying pour les procédés d'homologation auprès des instances réglementaires au travers de leur participation à différentes associations telles que IBMA ou d'organisations internationales telles que l'OCDE, la commission européenne.

En ce qui concerne les facteurs Myc, ils sont présents dans un petit nombre de produits développés récemment comme Torque, Ratchet et JumpStart LCO, pour le traitement du soja et du maïs. Leur développement et utilisation dans les cultures de céréales demande des mises au point sur la méthode de production industrielle, en cours de finalisation.

Impacts 1

- **Economique** : Amélioration du rendement de la productivité des cultures de soja et autres légumineuses. Les légumineuses représentent 25 % des surfaces cultivées aux USA tandis qu'en Europe elles ne représentent que 3%. L'impact économique des facteurs Nod se manifeste chez le fournisseur de la technologie, ici l'entreprise Novozymes d'une part et chez les utilisateurs, les cultivateurs de légumineuses (de soja principalement) d'autre part. Sur la base d'une hypothèse basse de gain de rendement du soja (3%), sur une surface de près de 6Mha traités annuellement nous pouvons estimer que le surplus économique généré entre 2004 et 2022 serait de plus de 1Md d'euros. Ce surplus affecterait à 95% les agriculteurs.

- **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 pourquoi elles sont utilisées à des doses très faibles de l'ordre d'un dixième de milligramme par hectare. Ces composés sont utilisés pour stimuler le développement racinaire et donc permettre une meilleure exploitation des ressources hydrominérales, et 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 céréales. Pour un meilleur rendement, très peu de principe actif, naturel et biodégradable, est disséminé dans l'environnement.

Impacts 2

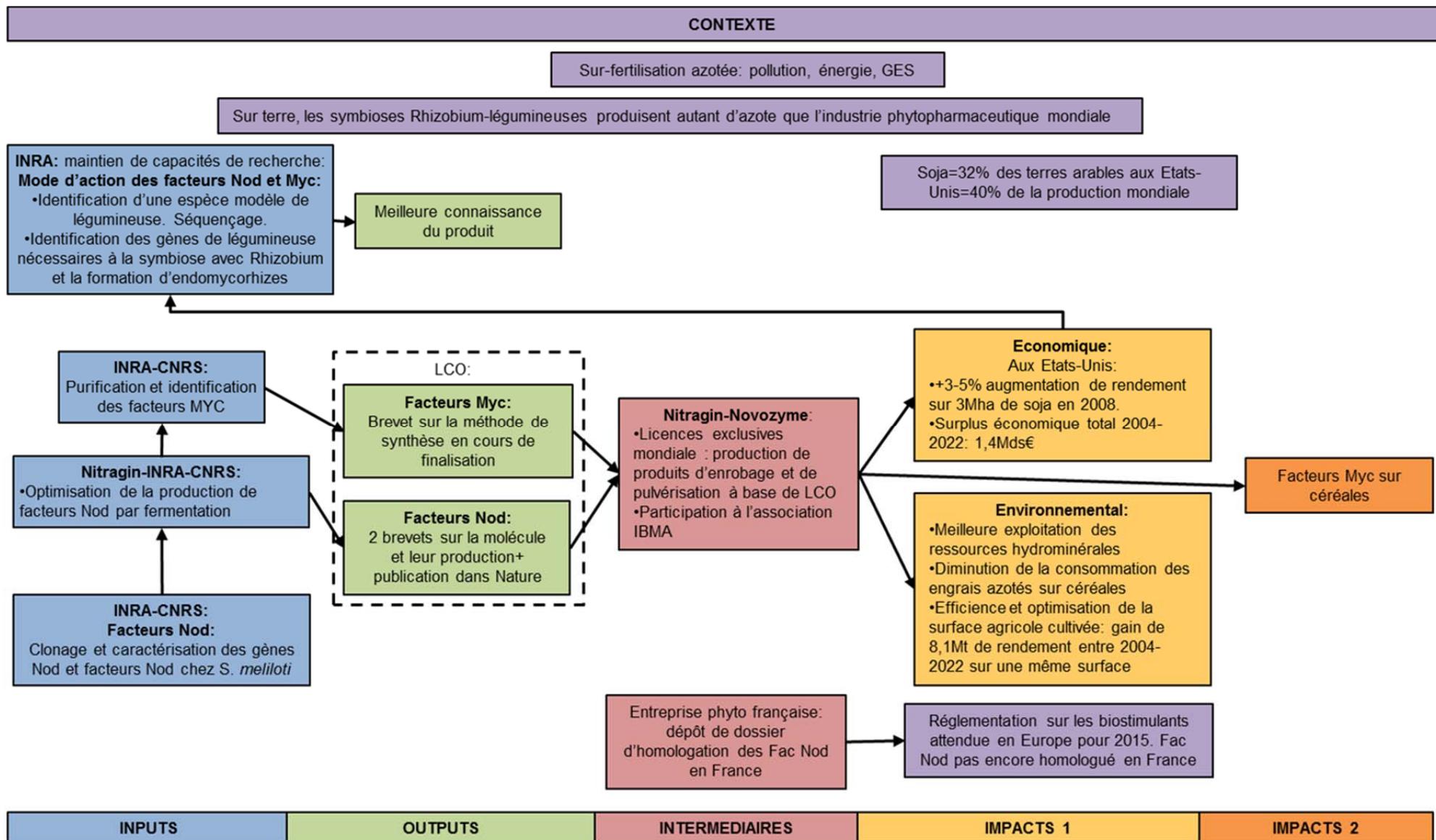
- **Recours aux facteurs Myc pour accroître les rendements**. Les résultats de recherche concernant l'amélioration de la productivité sur les céréales (blé, maïs) grâce à l'utilisation des facteurs Myc, sont brevetés et licenciés à l'entreprise. Les essais terrain qui débiteront en Europe en 2014-2015 devraient permettre leur utilisation en France et en Europe. Ainsi, les gains de productivité attendus des facteurs Myc pourront bénéficier dans des proportions similaires aux cultivateurs de céréales et de non-légumineuses de France et du monde entier.

- **Evolution de la réglementation**. Les règles de mise sur le marché des biostimulants sont en cours de détermination par la commission européenne. Notamment, des définitions seront adoptées pour identifier les substances pouvant relever de ces catégories³. Novozymes, en particulier l'entité française, participe depuis plusieurs années aux travaux de l'IBMA- France (www.ibmafrance.com) afin de proposer les meilleures règles d'utilisation de ces substances. L'exemple des Fac Nod permet de renforcer l'opportunité de cette réglementation.

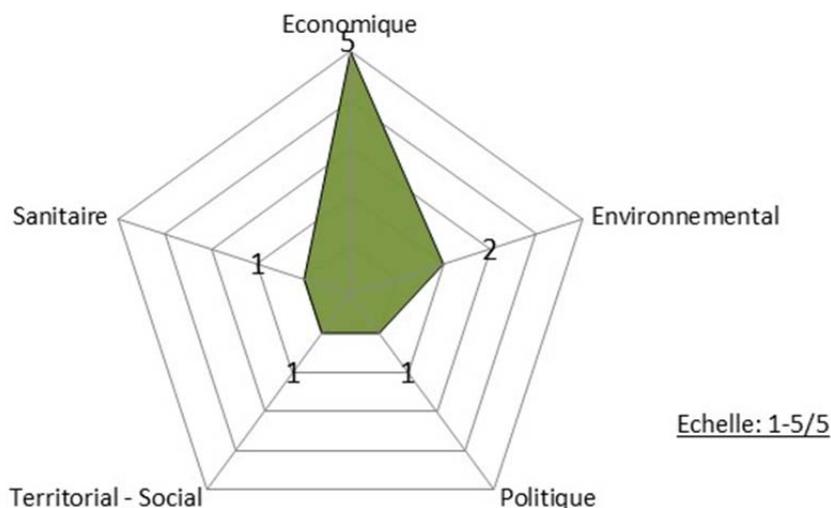
³ Définition provisoire et proposée: "A **plant biostimulant** is any substance or microorganism, in the form in which it is supplied to the user, applied to plants, seeds or the root environment with the intention to stimulate natural processes of plants to benefit their nutrient use efficiency and/or their tolerance to abiotic stress, regardless of its nutrients content, or any combination of such substances and/or microorganisms intended for this use.

In the above definitions, **substance** means a chemical element and its compounds, as it occurs naturally or by manufacture, including any impurity inevitably resulting from the manufacturing process."

Impact Pathway



Vecteur d'impact



| Dimension d'impact | Importance | |
|------------------------|------------|--|
| Economique | 5/5 | +3-5% d'augmentation de rendement sur 3Mha de soja aux EU en 2008 Surplus économique totale de 1,4Mds€ entre 2004 et 2022 |
| Environnemental | 2/5 | Meilleure exploitation des ressources hydrominérales Diminution de la consommation des engrais azotés sur céréales Efficience et optimisation de la surface agricole cultivée – sur la période 2004-2022 le gain en tonnage serait pour la même surface cultivée de 8,1 MT |

Source des données :

Entretiens

Jean Denarié: Directeur de recherches retraité INRA.

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

Bibliographie

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 1rst World congress on the use of biostimulants in agriculture, Strasbourg, 26-29 novembre 2012.