

ASIRPA

Analyse Socio-économique des Impacts de la  
Recherche Publique Agricole

# Fertilisation azotée et outils d'aide à la décision

## Executive Summary

*Janvier 2013*

*Version révisée le 18 juillet 2014*

Amandine Hocdé  
Pierre-Benoît Joly

La gestion de la fertilisation azotée est un enjeu majeur non seulement pour (i) la production agricole, car elle conditionne la quantité et la qualité des récoltes, mais aussi pour (ii) l'environnement et la société car ses dérives sont sources de pollutions importantes impactant le fonctionnement des écosystèmes et la santé humaine et pour (iii) la consommation d'énergie en agriculture.

L'INRA s'intéresse à cette thématique depuis sa création en étudiant la dynamique de l'azote dans le sol et dans la plante ainsi que ses effets sur la production agricole. Afin d'appliquer les connaissances produites, l'INRA a contribué à la création de plusieurs outils d'aide à la décision et de pilotage de la fertilisation: méthode des bilans (et les références, outils et logiciels associés); méthodes de gestion des fractionnements (et les outils et logiciels associés). Les connaissances et outils ont d'abord été produits sur le blé, utilisé comme plante agronomique modèle. Certains de ces outils ont ensuite été adaptés sur d'autres cultures.

Nous nous attachons à étudier ici la suite d'outils Azobil (1990) puis AzoFert (version dynamique d'Azobil créée en 2003). Leur objectif est d'ajuster la dose prévisionnelle d'azote à apporter à la culture afin d'optimiser l'utilisation des engrais et d'éviter ainsi les fuites de nitrates et une sur-utilisation d'intrant. Nous étudions leur diffusion ainsi que les moyens pour qualifier leurs impacts.

Ces deux outils s'inscrivent dans un champ plus vaste, celui des outils d'aide à la décision pour la fertilisation, qui comprend deux types d'instruments pour la fertilisation azotée :

- outils prévisionnels qui permettent de raisonner la stratégie de fertilisation en début de campagne (Azobil, AzoFert, mais aussi Azodyn, etc.) ;
- outils de pilotage en cours du cycle végétatif qui permettent d'ajuster cette stratégie en fonction des conditions climatiques de la campagne et de leurs incidences sur la croissance des plantes (Jubil, Ramses, bandes double-densité, etc.).

L'utilisation de la méthodologie de la trajectoire d'impact nous conduit à limiter l'analyse à ces deux outils. En effet ils ont un impact très significatif et précisément mesurable et ils ont été produits par le même laboratoire, dans la même configuration productive (bien qu'elle ait évolué au cours du temps). Cette focale vise ainsi à caractériser la contribution et l'impact de l'INRA, ce qui impose de restreindre le champ de l'analyse.

## Contexte

Le contexte scientifique dans lequel s'inscrit ce cas de recherche repose donc sur un capital scientifique historique très fort : la méthode du bilan à l'échelle de la parcelle. Cette méthode pose le principe de bilan prévisionnel d'azote : calcul des flux entrants (les fournitures ou azote disponible) et sortants (les besoins) du système considéré (le sol cultivé de la parcelle) et d'équilibre de la fertilisation (ces flux doivent s'équilibrer). Cette méthode permet d'établir une dose prévisionnelle d'azote pour une parcelle culturale.

Le poste le plus variable d'une année sur l'autre est le reliquat azoté à l'ouverture du bilan, mesuré à la sortie d'hiver (RSH) directement par analyse de sol. Les autres paramètres de l'équation sont renseignés ou calculés à partir de tables de références. Cette opération appelée paramétrage consiste en la réalisation d'essais croisant les différentes conditions de terrain.

Le contexte réglementaire est très important car il impose l'utilisation de méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée. En 1991, la Commission Européenne adopte la « Directive Nitrates » pour la protection de l'eau contre les pollutions azotées. La Commission Européenne a émis en novembre 2009 une mise en demeure adressée à la France pour insuffisance dans l'application de la Directive Nitrates. Le désaccord porte notamment sur les carences de mise en œuvre des méthodes de raisonnement de la fertilisation. Cette mise en demeure sera suivie d'un avis motivé en octobre 2011 puis en février 2012 d'un recours en manquement envers la France (saisie de la Cour de Justice de l'Union Européenne).

## Inputs et situation productive

La production des savoirs sur la fertilisation azotée et leur intégration au sein de logiciels ont été réalisées à l'unité d'Agronomie de Laon et ont nécessité la combinaison de différentes compétences. Dans les années 80, suite à l'élaboration de la méthode du bilan, un ingénieur agricole, associé à deux chercheurs successivement, acquière des connaissances sur le cycle de l'azote à partir d'essais sur le blé et la betterave. Ils développent ainsi des savoirs supplémentaires sur la nutrition azotée des plantes dans le but de quantifier leurs besoins, sur les conditions d'utilisation de l'azote des engrais par les cultures et sur la dynamique (cinétique de minéralisation) de l'azote minéral dans les sols cultivés. Ces premières connaissances ont débouché sur la construction, en 1990, du modèle AZOBIL basé sur un bilan d'azote minéral statique, intégré dans un logiciel grâce aux compétences d'un ingénieur informaticien.

Dans les années 90, la poursuite des expérimentations et l'arrivée de compétences nouvelles au travers d'un chercheur spécialiste de l'azote et maîtrisant notamment de nouvelles techniques de suivi d'azote radioactif, permettent à l'équipe de mettre à jour le devenir de l'azote des engrais avec notamment le rôle des micro-organismes du sol sur sa disponibilité. Les thématiques évoluent ensuite vers l'effet des dates d'apport et l'étude de la vitesse de croissance des plantes.

Au début des années 2000, les nouvelles connaissances à disposition sur les aspects dynamiques du cycle de l'azote dans les sols cultivés permettent à l'équipe de concevoir un nouveau modèle de bilan, cette fois-ci dynamique. L'équipe met au point en 2003 le modèle AzoFert qui succède à Azobil (également intégré dans un logiciel par le même ingénieur informaticien). L'ensemble des recherches a nécessité les compétences de 3 chercheurs en agronomie, un ingénieur agricole et un ingénieur informaticien.

Pour la conception et la mise au point de ces logiciels, le partenariat amont a joué un rôle essentiel :

### ***Le Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche (LDAR)***

Le LDAR assure les analyses de sol nécessaires à l'établissement des mesures de reliquats azotés. Des agents du laboratoire se sont investis dans les recherches sur le cycle de l'azote et la compréhension des dynamiques de minéralisation de l'azote qui ont abouti aux différents modèles. En particulier, ils ont participé, au même titre que les chercheurs et ingénieurs de l'INRA, à l'exploitation des données expérimentales produites par les essais.

### ***L'Institut Technique de la Betterave (ITB)***

L'Aisne est le premier département betteravier de France. La disparité dans la mise en œuvre de la méthode du bilan par les différents prescripteurs de conseil en fertilisation azotée amène l'ITB à entamer une réflexion afin d'uniformiser les méthodes et éviter les résultats divergents qui tendent à discréditer les conseils auprès des agriculteurs. C'est dans cette optique que l'ITB entre en relation avec l'INRA de Laon et le LDAR à la fin des années 80. L'ITB a mis à disposition son réseau en élaborant un programme d'expérimentation de 40 essais chez les agriculteurs afin de valider le modèle d'Azobil puis AzoFert.

### ***Arvalis (anciennement Institut Technique des Céréales et des Fourrages, ITCF)***

A la suite de la parution de la méthode du bilan en 1969, Arvalis s'est fortement investi dans sa mise en œuvre pour les céréales. L'Institut a mis en place un important réseau d'essais sur cultures céréalières dans le but de paramétrer la méthode du bilan sur un grand nombre de milieux. Son objectif était ici de proposer une référence générale pour le raisonnement de la fertilisation azotée en France. L'Institut s'est fortement intéressé au modèle d'Azobil développé par l'INRA et le LDAR au cours des années 90. A partir d'Azobil, Arvalis va développer son propre outil logiciel, adaptable et paramétrable selon ses besoins, AzotITCF. Cet outil ne sera que faiblement diffusé en partie du fait du faible développement des outils informatiques à cette époque.

Il faut également noter qu'une plus grande structuration du domaine a été réalisée avec la création du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « fertilisation raisonnée » (2003) puis du Réseau Mixte Technologique (RMT) « fertilisation et environnement » (2007).

## Outputs :

### **Des outils : des modèles paramétrés et intégrés dans des logiciels**

Les recherches de l'INRA, du LDAR, de l'ITB et auxquelles a contribué Arvalis ont débouché sur 2 modèles conceptuels successifs de la méthode du bilan : Azobil en 1990 et AzoFert en 2003.

Le modèle Azobil consiste en une modélisation de la méthode du bilan pour laquelle il identifie 11 postes principaux (i.e. 11 états de l'azote utilisés pour la modélisation). Les travaux de paramétrage ont d'abord été axés sur la betterave, l'orge et le blé pour les régions de la Picardie et de la Champagne. Les données sont mesurées expérimentalement et incluses dans des tables de références. La première version est proposée en 1990 sous la forme de disquettes comprenant des applications pour 26 cultures annuelles. Les recherches étant poursuivies, une deuxième version sera proposée en 1995 élargissant le nombre de cultures et les contextes pédoclimatiques paramétrés.

Les nouvelles connaissances acquises sur la minéralisation de l'azote organique (organisation microbienne, cinétique de minéralisation,...) au cours des années 1990 ne peuvent pas, techniquement, être intégrées dans le logiciel Azobil. Les chercheurs de Laon décident alors dès 2000 d'élaborer un nouveau modèle : le modèle AzoFert, dynamique, qui ne se base plus sur des données forfaitaires mais en modélise une partie en fonction des données climatiques journalières normalisées et qui compte 16 postes différents.

### **Propriété intellectuelle**

La version 1.0 du logiciel AzoFert a fait l'objet d'un dépôt auprès de l'Agence de Protection des Programmes (APP) en 2000 tandis que la marque AzoFert a été enregistrée auprès de l'Institut National de la Propriété Intellectuelle (INPI) le 13 novembre 2000.

Un contrat de recherche sur AzoFert, mis en place en novembre 2005 dans le cadre d'un GIS entre l'INRA, le LDAR et les Instituts techniques impliqués (l'ITB et le CTIFL) établit la répartition de la propriété intellectuelle sur les résultats. Ainsi, les droits de propriété sur le modèle conceptuel fondant le logiciel et son moteur d'interprétation reviennent à l'INRA tandis que le CTIFL et l'ITB sont propriétaires des données générées au cours des recherches (bases de données expérimentales : réseaux d'essais, ...). Le LDAR et l'INRA sont co-propriétaires du domaine de paramétrage de la version 1.0. Ce contrat a évolué en une convention cadre impliquant l'ensemble des partenaires du RMT « Fertilisation et Environnement ».

Par ailleurs, de nombreuses publications scientifiques d'excellence ont jalonné le développement des différentes générations de modèles d'aide à la fertilisation azotée.

## Circulation des connaissances et intermédiaires :

La diffusion de ce type d'outils suppose leur adoption par des agriculteurs dans des situations extrêmement différentes. Les intermédiaires et prescripteurs jouent donc ici un rôle essentiel.

### **Les éditeurs de logiciels**

L'édition du logiciel AZOBIL est confiée à la société Arcade Conseils en 1998 (auparavant, la diffusion du logiciel était assurée par le LDAR). En 2004, le même choix est fait concernant l'édition d'AzoFert. Suite à des restructurations en 2007 puis 2009, c'est désormais I-Cône, filiale d'Isagri spécialisée dans les logiciels en agronomie-environnement, qui exploite et diffuse le logiciel. La protection du logiciel et l'articulation avec les activités du RMT sur AzoFert sont en cours de définition entre I-Cône et l'INRA Transfert (le logiciel n'est pas encore proposé via son site internet).

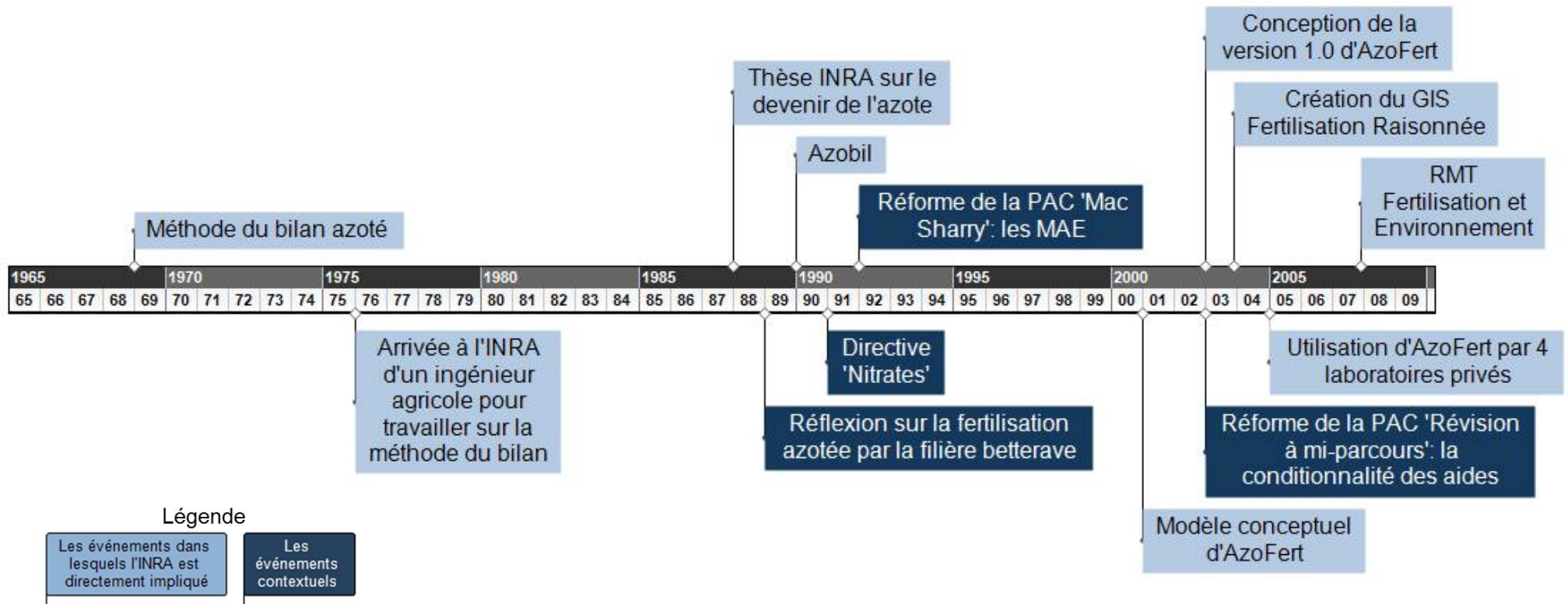
### **Les techniciens des instituts, les coopératives agricoles et les chambres d'agriculture**

La circulation des résultats des recherches menées à Laon a été assurée par l'action conjointe de l'ingénieur agricole de l'INRA et des partenaires des recherches, le LDAR et l'ITB. L'arrivée d'un nouvel outil (Azobil ou AzoFert) a chaque fois nécessité un travail en profondeur auprès des utilisateurs potentiels pour les convaincre de la pertinence et de l'intérêt de l'outil.

L'ITB, dans la continuité de sa promotion de la méthode du bilan prévisionnel et d'une harmonisation des conseils azotés auprès des producteurs de betteraves, s'est fortement investi dans la communication et la promotion des 2 logiciels auprès des laboratoires et des agriculteurs.

Dans l'Aisne, les arrivées d'Azobil puis d'AzoFert ont été plutôt bien accueillies du fait (i) que le LDAR soit à la fois partenaire des recherches et utilisateur et (ii) de la promotion intense de l'ITB. Par contre, leur adoption dans d'autres secteurs (Marne, Champagne) a été plus difficile. Le LDAR et l'INRA ont dû assurer une promotion très forte des logiciels auprès des techniciens/conseillers. Cela s'est traduit par des réunions d'informations, de formation qui étaient aussi l'occasion de discuter des résultats des logiciels, de les comparer entre eux et avec les références locales.

## Chronologie



- Les recherches à l'origine d'AzoFert s'appuient sur des travaux et un bassin de connaissances développés dans les années 60. Azobil, créé en 1990, est issu de connaissances sur le cycle de l'azote, le devenir de l'engrais et les besoins des plantes (en particulier blé et betterave) cumulées sur plus de 30 ans. Cette modélisation de la méthode du bilan et sa transposition informatique s'appuie sur le soutien fort de l'Institut Technique de la Betterave depuis les années 80.
- Azobil, méthode crédible (issue de l'INRA) et robuste (testée par les acteurs en particulier dans le nord), coïncide avec des événements politiques incitant à équilibrer la fertilisation azotée
- La poursuite des recherches affine le modèle (notamment en le rendant dynamique grâce au développement conjoint de l'informatique) : le modèle AzoFert est créé 10 ans plus tard
- Afin d'assurer la diffusion des connaissances contenues dans AzoFert et la diffusion du modèle (par son adaptation à d'autres cultures ou conditions pédo-climatiques), les acteurs se structurent au sein du GIS Fertilisation Raisonnée (devenu RMT Fertilisation et Environnement), poussés par la pression politique sur la question environnementale de la fertilisation.

Par rapport aux autres pays européens qui utilisent des outils très simplifiés (tableaux de référence) la présence de l'INRA et les configurations productives (notamment les partenariats composites) ont conduit à l'adoption par les agriculteurs de méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée sophistiquées et intensives en connaissances. C'est potentiellement un très fort avantage compte tenu de la pertinence des outils utilisés. Mais cette singularité peut entraver l'harmonisation réglementaire européenne.

Les impacts sont estimés à partir de la collecte des informations sur la diffusion des logiciels Azobil et Azofert. Ces données permettent d'estimer les surfaces impactées pour les principales cultures visées. Parallèlement, les enquêtes auprès des experts et la collecte de documents sont utilisées pour estimer les effets de ces outils sur la réduction des doses d'azote. Cette méthode permet donc d'estimer de façon fiable l'impact de l'INRA. Il faut néanmoins souligner qu'il s'agit d'une estimation prudente dans la mesure où l'impact passe aussi par d'autres outils et par des formes de transfert diffuses.

## Impacts 1:

Les impacts de niveau 1 concernent les cultures de blé et de betterave à sucre dans les premiers départements concernés (Aisne et départements limitrophes).

Pour la betterave à sucre, l'utilisation du conseil Azofert concerne 315 000 ha en 2012, soit un taux de pénétration de 80%. La dose d'azote a été diminuée de moitié, sans freiner l'augmentation des rendements. La sur-fertilisation azotée est une source avérée de pollution par les nitrates et d'eutrophisation et affecte la qualité des sols (érosion, fertilité), la qualité de l'air, la biodiversité. Les logiciels permettant un meilleur équilibre de la fertilisation azotée ont donc un impact environnemental majeur. Par ailleurs l'économie d'engrais est estimée à plus de 300 M€ pour la période 1990-2015 (valeur 2011 avec un prix de 1€ par unité d'azote) : l'impact économique du raisonnement de la fertilisation azotée est donc important.

Pour le blé, l'utilisation d'Azofert concerne 374 000 ha, soit un taux de pénétration de 8%. L'évolution des doses d'azote est très dépendante du prix du blé et de celui des engrais, de sorte qu'il est difficile d'évaluer l'effet propre d'Azofert et par conséquent l'impact environnemental et économique. L'impact est limité par la concurrence d'autres outils d'aide à la décision (de prévision et de pilotage).

## Impacts 2:

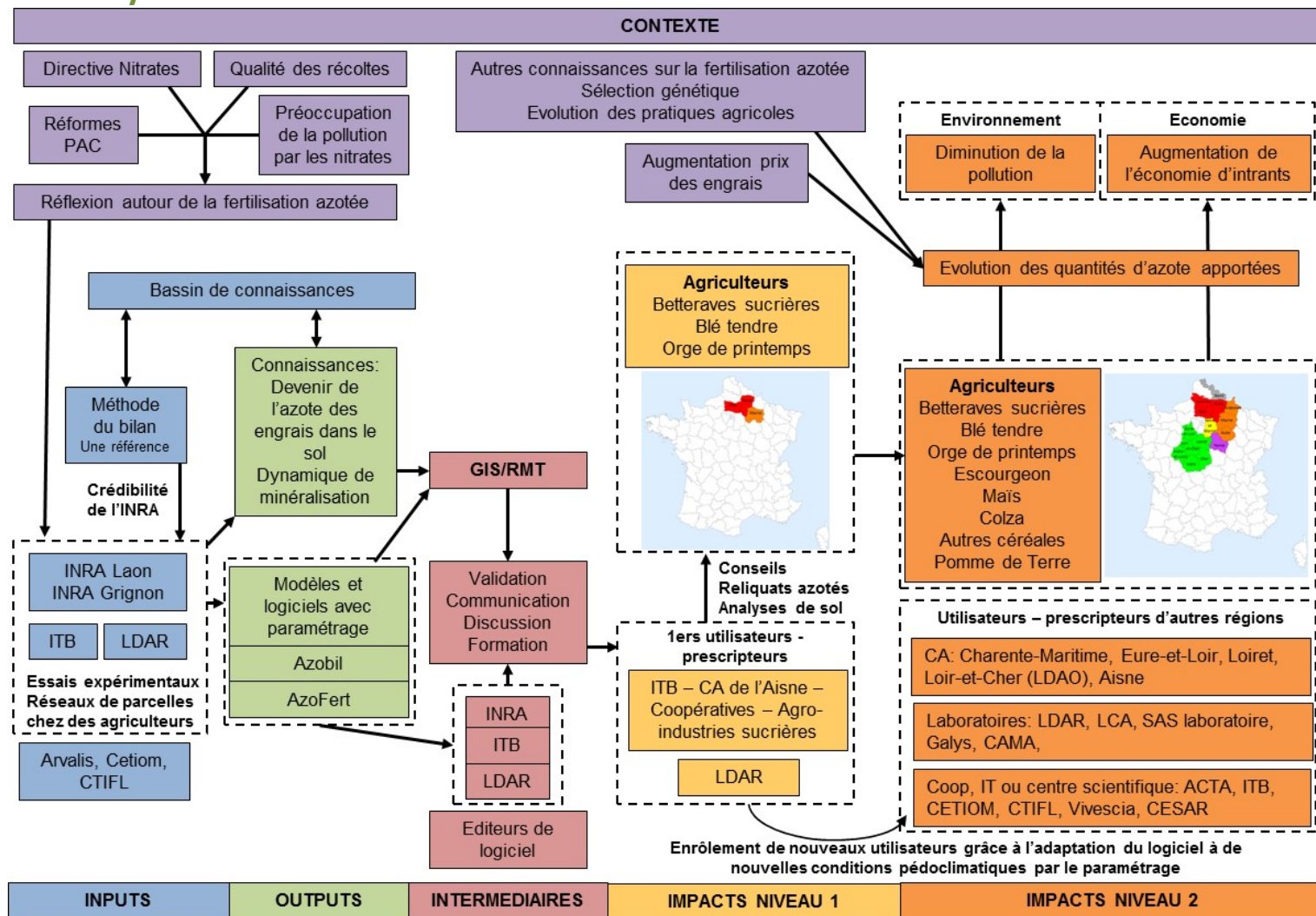
Le processus de généralisation de l'utilisation des logiciels à d'autres territoires et d'autres cultures est assez lourd. Il nécessite de re-paramétrer l'outil selon les caractéristiques locales : du sol (granulométrie, texture,...) ; des produits organiques utilisés (cinétiques de minéralisation) et du climat (pluviométrie, température...).

Il faut enfin valider l'utilisation d'AzoFert par des essais avec des témoins non fertilisés pour vérifier l'adéquation des doses d'azote conseillées avec les quantités absorbées par les cultures.

En général ces travaux sont réalisés par les nouveaux acteurs en partenariat avec l'INRA et le LDAR. Le GIS/RMT a d'ailleurs permis de structurer la généralisation de l'adoption en mettant en place des réseaux pour améliorer le paramétrage (Réseaux Produits Résiduels Organiques, CASDAR Effluents d'élevage) et en impliquant l'ensemble des acteurs du RMT dans ce travail, par exemple la validation d'AzoFert est en cours par le CETIOM.



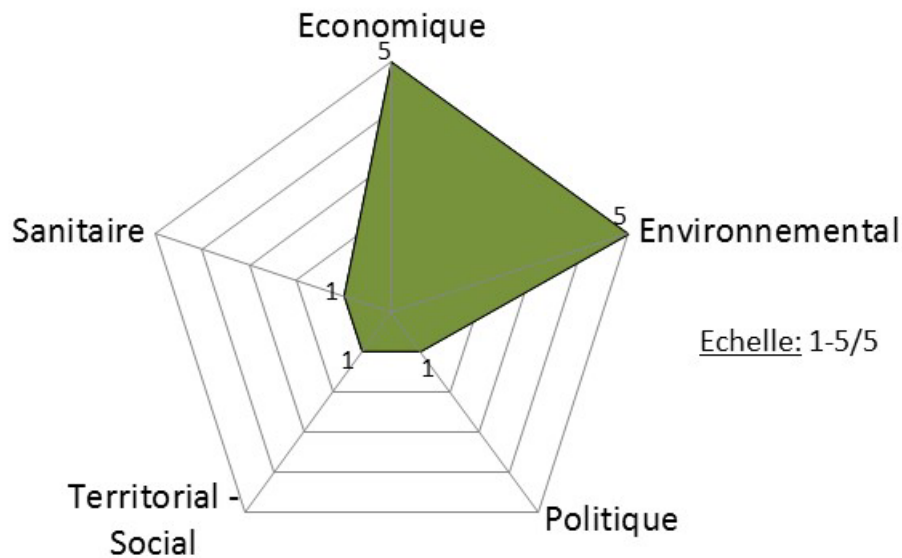
## Impact Pathway



- Diverses pressions incitent au raisonnement de la fertilisation azotée. Ce contexte et des relations de longues dates encouragent la mise en commun des ressources pour améliorer les connaissances sur le cycle de l'azote: un important réseau d'agriculteurs de betteraves pour l'ITB, des parcelles expérimentales pour l'INRA et un savoir-faire en analyse de sol pour le LDAR.
- Certains acteurs de la situation productive contribuent à la diffusion des connaissances et du logiciel (Arvalis, le Cetiom et le CTIFL appartiennent au GIS/RMT). Compte tenu de la spécificité du format de diffusion des connaissances (logiciel) on trouve aussi parmi les intermédiaires indispensables un éditeur de logiciels chargé de la maintenance et de la vente de licences.
- Cet impact pathway souligne le principe de généralisation des outputs de la recherche. Développé et particulièrement robuste pour la culture de betteraves dans l'Aisne, l'Oise et la Marne (= zone couverte par le LDAR), l'utilisation du logiciel s'étend presque simultanément à d'autres cultures puis à d'autres régions françaises, élargissant ainsi la couverture de ses impacts.



## Vecteur d'impact



Dimension d'impact	Importance	
<b>Environnemental</b>	5/5	<p>-Betterave: Utilisation du conseil AzoFert sur 315 000 ha en France (taux de pénétration de 80%). 80 unités d'azote en moins par hectare soit une diminution de 45% de la dose d'azote depuis 1990 (de 180 à 100 unités d'azote en moyenne)</p> <p>-Blé: Utilisation du conseil AzoFert sur 374 000 ha en France (taux de pénétration de 8%). Augmentation des doses entre 1990 et 2000 (de 175 à 200 unités/ha) puis diminution de 2000 à 2011 (de 200 à 180 unités/ha soit 10%). L'évolution des doses est soumise à d'autres facteurs (ex: prix azote) dont l'influence est plus importante que celle du conseil.</p>
<b>Economique</b>	5/5	<p>-Betterave: Diminution de l'azote sans impacter le rendement voire contribuant à l'amélioration du rendement en sucre (+ 3,5t de sucre/ha) → économie de charges pour les agriculteurs. (21 000 agriculteurs sur les 26 000 planteurs de betteraves français).</p> <p>L'économie d'engrais réalisée entre 1990 et 2015 par l'ensemble des producteurs de betteraves, blé et orge est estimée à plus de 300M€ (valeur 2011 avec un prix de 1€ par unité d'azote)</p>

## Source des données :

Cette étude de cas est fondée sur un travail bibliographique et une quinzaine d'entretiens semi-directifs conduits avec les acteurs de l'innovation : responsables scientifiques de l'INRA et du Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de l'Aisne, conseillers de chambres d'agriculture, représentants d'Arvalis et de l'ITB...