

ASIRPA

Analyse Socio-économique des Impacts de la
Recherche Publique Agricole

Méta-cas – Impact des recherches de l'INRA sur la fertilisation minérale en France

Avril 2014

Révisée le 25.7.2014

Pierre-Benoit Joly
Sylvain Pellerin
Sylvie Recous

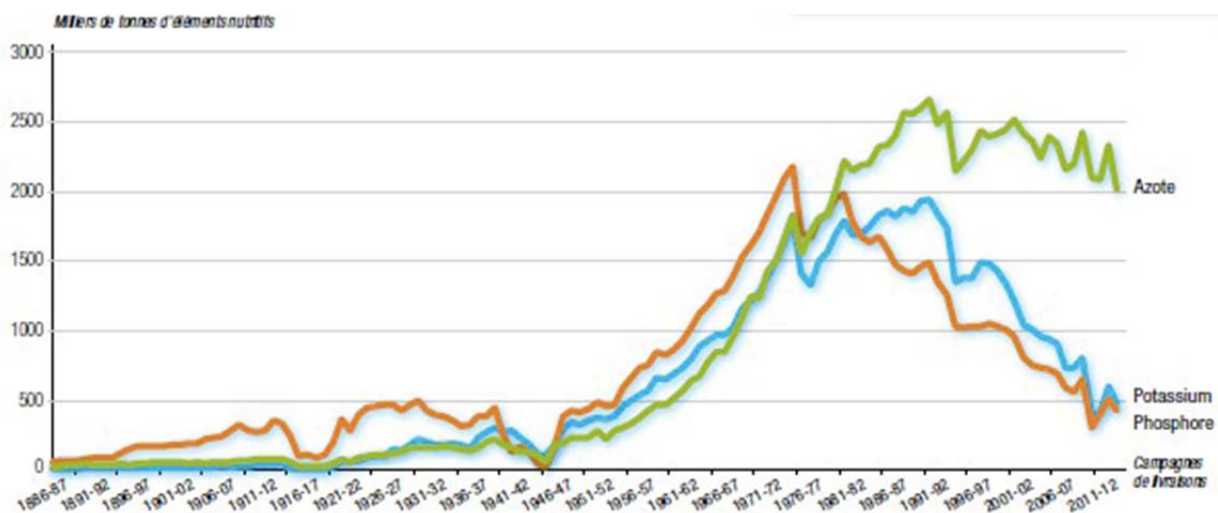
Un constat : la réduction de la fertilisation minérale en France, ses effets économiques et environnementaux

Introduction

L'utilisation d'engrais d'origine minérale a été l'un des piliers de la modernisation agricole depuis la seconde guerre mondiale et elle a conditionné la forte augmentation des rendements agricoles. Néanmoins, la fertilisation pèse fortement sur l'économie des exploitations céréalières puisqu'elle représente actuellement 15% des charges totales. En outre elle contribue à la pollution des eaux de surface, à l'émission de gaz à effets de serre (les émissions de N₂O, fortement liées à l'usage des engrais N, représentent 50% des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole), et à la consommation d'énergie (il faut l'équivalent d'1 litre de pétrole pour produire 1 kg d'azote). Concernant spécifiquement le phosphore, une grande partie des ressources géologiques non renouvelables a été consommée en quelques dizaines d'années. Le « pic » mondial d'utilisation est prévu en 2035. Au-delà, compte tenu qu'il n'existe aucun produit de substitution, la satisfaction des besoins agricoles (qui consomme plus de 90 % du phosphore extrait des gisements) sera de plus en plus difficile, techniquement et économiquement.

Cependant l'évolution française de la consommation d'engrais permet d'observer des changements de comportement des agriculteurs (Figure 1): baisse brutale de la consommation d'engrais P et K depuis le début des années 1970, baisse de la consommation d'engrais azotés depuis le début des années 1990, mais nettement moins marquée que pour P et K.

Figure 1 : L'utilisation d'engrais minéraux en France depuis la fin du XIX^e siècle



Source : UNIFA

L'objet de cette note est de (i) prendre la mesure de l'évolution de la fertilisation minérale en France et (ii) analyser la contribution des travaux de recherche de l'INRA à ces changements.

L'évolution de la fertilisation minérale en France et ses impacts économiques et environnementaux

En France, depuis 1988/89, les quantités d'engrais de synthèse utilisées ont baissé de 18%, 66% et 73% respectivement pour l'azote (N), le phosphore (P) et la potasse (K). Dans le même temps, la surface fertilisable baissait d'un peu moins de 10% mais la production végétale totale augmentait de 30%. Cette réduction signifie donc une augmentation très significative de l'efficacité de la dose d'engrais, liée à une amélioration des pratiques de fertilisation ainsi qu'à la génétique et l'amélioration des plantes.

Pour les 24 dernières années, le cumul des économies réalisées du fait de la réduction de l'utilisation d'engrais sont respectivement (en €, valeur 2013) :

-4 133 millions € pour l'azote

- 3 088 millions € pour le phosphore
- 13 119 millions € pour la potasse

Cet effet économique est amplifié en prenant en compte dans le calcul l'amélioration de l'efficacité de la fertilisation c'est à dire en tenant compte de l'augmentation de la production végétale. Les effets économiques sont alors respectivement (en €, valeur 2013) :

- 8 509 millions € pour l'azote
- 3 453 millions € pour le phosphore
- 14 200 millions € pour la potasse

On peut aussi estimer les effets environnementaux (sans prise en compte de l'effet efficacité) :

- En France, les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) sont calculées précisément depuis 1990. En 2009, elles s'élevaient à 205kt (hors UTCF¹), avec pour principal émetteur l'agriculture et la sylviculture qui représentaient 84% de ces émissions en France métropolitaine, principalement lié aux apports azotés sur les sols cultivés avec l'épandage des fertilisants minéraux et d'origine animale. L'industrie manufacturière (principalement production d'engrais, et traitements des déchets dont l'eau) représentait 10.1% des émissions totales (hors UTCF). Sur la période 1990-2009, les émissions ont baissé de 32.8% (-98 kt) dont -67kt lié à l'amélioration du secteur de l'industrie manufacturière (amélioration des procédés de fabrication d'acide nitrique notamment) et -33 kt lié à la réduction des quantités d'engrais azotés et la réduction des volumes de déjection à épandre².

- En utilisant les tonnages d'engrais azotés économisés sur les 24 dernières années (voir ci-dessus), et les atténuations unitaires (directes et indirectes) proposées par l'expertise GES de l'INRA, on estime alors la réduction totale des GES, exprimées en équivalent CO_2 à 53 752 kt CO_2e (équivalent CO_2).

- La qualité des eaux souterraines (principale source d'eau potable sur le territoire français) peut refléter, en ce qui concerne la concentration en nitrates, les effets de la réduction de l'usage des fertilisants minéraux. Néanmoins les phénomènes de transfert des nitrates vers les eaux souterraines sont complexes et varient selon la profondeur des nappes et la nature des sols. Avec cette inertie, le temps de renouvellement de l'eau des nappes dépasse fréquemment les 10 ans. En conséquence, les nitrates mesurés aujourd'hui dans la plupart des nappes proviennent en grande partie d'épandage et de rejets anciens. Selon l'indice national d'évolution des teneurs en nitrates³, les concentrations en nitrates augmentent dans les nappes de métropole, entre 1996 et 2004, puis se stabilisent (Figure 2). Les fluctuations annuelles sont liées à la pluviométrie, avec des concentrations plus faibles les années sèches, comme en 2005. Ainsi il n'est actuellement pas encore possible d'observer un impact positif de la diminution progressive de la fertilisation azotée minérale sur les teneurs en nitrate actuelles des eaux souterraines métropolitaines.

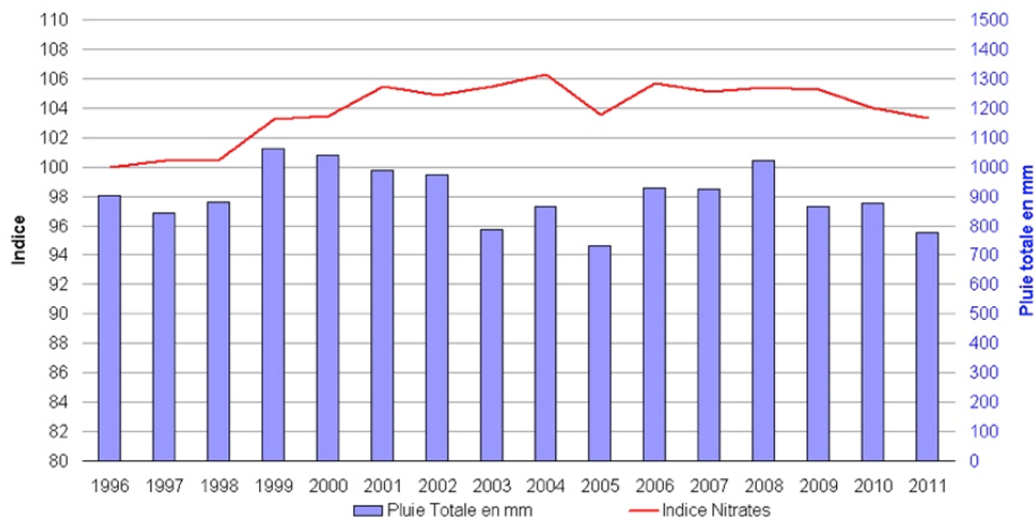
¹ UTCF : Utilisation des Terres, leur Changement et la Forêt

² CITEPA (2011) Emissions dans l'air en France métropolitaine – effet de serre. 10-13

³ Ministère de l'Ecologie et du développement durable (2013): Évolution des nitrates dans les eaux souterraines. Observations et statistiques, 24 Mai 2013

Figure 2 : Evolution de la qualité des eaux depuis 1996

Indice national d'évolution des nitrates dans les eaux souterraines métropolitaines de 1996 à 2011



Source : agences de l'eau - BRGM, banque de données ADES, 2012 - Réseaux RCS, RCO - Météo France, MEDDE/DEB.
 Traitement : SOeS, 2012

Analyse de la contribution de l'Inra

Il faut distinguer d'un côté la fertilisation N et de l'autre P et K, compte tenu de l'histoire des recherches et des modalités de la contribution de l'INRA. Cependant ces deux cas ont en communs deux éléments très importants :

- Une origine commune de recherche pluridisciplinaire dès les années 60

La fertilisation est l'un des domaines de l'agronomie où le système de recherche-développement a produit et agrégé des connaissances qui ont permis l'élaboration d'outils de diagnostic et d'aide à la décision utilisés à grande échelle. Ainsi, le raisonnement de la fertilisation a profondément évolué dès les années 1960, en particulier avec la formalisation de l'expertise agronomique et l'introduction d'un raisonnement algorithmique. En France, le premier logiciel d'interprétation d'analyses de terre, « Laona », est conçu à la Station Agronomique de l'Aisne en 1969 par un binôme de chercheurs de l'INRA agronome et biométricien. Va s'ensuivre une série d'outils d'aide à la décision pour la fertilisation N/P/K

Une très large part des recherches qui ont contribué à l'évolution des pratiques de fertilisation ont été conduites au sein des départements d'agronomie et de science du sol, qui ont été fusionnés en 1998 dans le département Environnement et Agronomie.

- Un partenariat de transfert très structuré

Ces outils ont été élaborés à partir des connaissances produites par la recherche et leur déploiement a été largement accompagné par les organismes de développement (instituts techniques, chambres d'agriculture) et les organismes économiques (laboratoires d'analyse, coopératives). Ces partenaires ont contribué à la mise au point des versions opérationnelles de ces outils, à les adapter aux conditions locales, à les paramétrer et à former leurs utilisateurs. La coordination des différents acteurs intervenant dans le champ de la fertilisation a été faite par deux structures qui jouent un rôle complémentaire :

- le COMIFER, Comité Français d'Etude et Développement de la Fertilisation Raisonnée, créé en 1980. Cette association regroupe les Administrations publiques, la Recherche, l'Enseignement, les Organisations Professionnelles Agricoles (Instituts techniques, Chambres d'Agriculture) et les industriels de la fertilisation et les structures de distribution. Son objectif est de « mettre à la disposition de l'agriculteur le moyen de gérer de façon rationnelle et économe, la fertilité de son sol » (allocution de Jean Marrou, INRA,

premier Président du COMIFER). Son premier « Forum » a eu lieu à Paris en janvier 1982. Dans son discours d'ouverture, Edith Cresson, Ministre en charge de l'Agriculture, rappela la nécessité « *d'accroître la productivité agricole* », sans être « *en contradiction avec un objectif de qualité des produits et de l'environnement* ».

- le GIS « *Fertilisation Raisonnée* », créé en 2005. Le GIS vise à coordonner les recherches sur la fertilisation et il était centré, à sa création, sur trois projets : RégiFert[®], AzoFert[®] et AzoSystem⁴. En 2007, suite à la mise en place des « Réseaux Mixtes Technologiques » (RMT) par le ministère de l'agriculture, le GIS a été transformé en RMT *Fertilisation & Environnement*. Le RMT fédère actuellement 33 partenaires de la recherche, du développement et de la formation agricole. Ses membres mènent des activités conjointes visant à améliorer la connaissance et la gestion des cycles biogéochimiques des éléments minéraux en agriculture et les outils de raisonnement de la fertilisation en agriculture.

⁴ Devenu en 2010 l'outil Syst'N[®]

Evolution de la fertilisation P et K

Inputs et situation productive : historique des connaissances scientifiques mobilisées sur P et K

L'acquisition de connaissance sur la biodisponibilité du phosphate (P)

Dans une première phase, des années 1960 aux années 1980, la recherche de l'INRA s'est focalisée sur les méthodes de caractérisation de la biodisponibilité du phosphore dans les sols et sur l'élaboration de référentiels associés par l'analyse de courbes de réponse⁵. Ces travaux se sont fondés sur de nombreux essais réalisés dans des conditions agronomiques très diverses (Toulouse, Clermont-Ferrand, Châteauroux, Quimper, Versailles,...) et pour différentes cultures, visant ainsi à prendre en compte les effets des rotations et les effets climatiques. Ces travaux ont abouti à la mise au point d'un premier outil de diagnostic et de prescription largement utilisé, la méthode CERES (Rémy et Marin-Lafèche, 1974)⁶. Ce logiciel fut alors utilisé pour déterminer les préconisations de fertilisation de nombreux acteurs, notamment la Société Commerciale des Potasses d'Alsace (SCPA) qui était alors le principal producteur de potasse (K).

L'INRA a produit des connaissances fondamentales concernant la compréhension de l'absorption du phosphore par les plantes en associant des travaux d'agronomie générale, de physiologie végétale, de sciences du sol,... et en utilisant différentes techniques d'analyse permettant notamment de tracer le phosphore grâce aux méthodes isotopiques (³²P). Les travaux principalement conduits en partenariat avec le CEA ont alors joué un rôle de premier plan au niveau international et constituent le socle de nouvelles approches.

La multiplication des dispositifs de longue durée

Le travail entrepris par l'INRA autour de la mise en place d'essais de fertilisation de longue durée a été relayé par la SCPA et surtout par les Lycées Agricoles, ce qui a permis à la fin des années 1980 de disposer de 90 essais de longue durée.

La synthèse des connaissances pour la construction d'une nouvelle approche de la fertilisation

En 1984, la Commission Nationale Agronomique, créée par le ministère de l'agriculture dans le prolongement des Etats généraux du développement agricole, est chargée du pilotage de la « Relance Agronomique ». Elle lance le projet LIAT « Logiciel d'Interprétation d'Analyses de Terres ». L'objectif était de concevoir un outil d'aide à la décision capable d'interpréter les analyses de terre d'exploitations de grandes cultures ou d'élevage et de produire des outils régionalisés en s'appuyant sur le réseau des comités régionaux de fertilisation.

L'INRA réalise alors un travail considérable de synthèse des travaux de ses différentes équipes de recherche spécialisées en fertilisation P et K et plus généralement des essais de fertilisation de longue durée. Cette synthèse, conduite par les Unités d'Agronomie de Laon, de Toulouse, de Bordeaux, en collaboration avec le Laboratoire Départemental Agronomique du Département de l'Aisne (LDAR) a été publiée en 1988⁷. La synthèse des données et les nouvelles connaissances fondamentales a permis de concevoir une nouvelle approche pour la fertilisation de P et K. Cette approche introduit plusieurs changements afin de pallier les

⁵ Il faut aussi noter que l'INRA a aussi joué un rôle essentiel pour la normalisation des engrais. Orsini, de la station de Laon, va assurer le secrétariat du Bureau d'Homologation des Matières Fertilisantes pendant de longues années, de 1986 à 1998. (Julien 2012).

⁶ Rémy J-C., Marin Lafèche A., 1974. - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Ann. Agron., 25 (4), pp 607-632.

⁷ GACHON L., 1988. *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante: conséquences sur la fertilisation*, INRA éditions. Voir notamment la partie "enseignements fournis par des essais de longue durée...". Certains fondements des évolutions futures du mode de raisonnement, qui va conduire à des réductions de doses, apparaissent par ex p 377, p 381. Voir aussi : MOREL et al., 1992. La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé. Agronomie 12, 565-579. Cet article montre sur l'exemple du blé comment le traitement des données d'essais de longue durée permet d'établir des seuils et de faire des préconisations de fumure sans risque de perte de rendement.

limites de l'approche traditionnelle : notion d'exigence des espèces, légitimation de l'impasse⁸, abandon de la notion de fumure de correction. L'objectif devient davantage de satisfaire les besoins de la culture plutôt que d'atteindre un niveau de teneur du sol jugé souhaitable. Un ingénieur du département EA est chargé de ce travail de synthèse réalisé en collaboration avec un réseau d'utilisateurs, notamment avec des ingénieurs de l'ITCF (devenu Arvalis-Institut du Végétal) et de la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne. Le document qui présente la nouvelle approche de façon simplifiée, repris dans la revue *Perspectives Agricoles*⁹, constitue la base des nouvelles préconisations du COMIFER publiées pour la première fois en 1993.¹⁰

Outputs : deux outils opérationnels au service de la diffusion de cette nouvelle approche

En 1998, le LIAT devenu opérationnel est diffusé sous le nom de RégiFert^{®11}. Le logiciel RégiFert[®] donne des possibilités de paramétrage très étendues¹², ce qui permet d'adapter son usage à des conditions très diverses. Il est utilisé par des Laboratoires d'Analyse disposant de compétences agronomiques spécialisées ou par certaines coopératives comme Champagne Céréales qui ont des services agronomiques spécialisés.

La grille COMIFER constitue une version simplifiée de RégiFert[®]. Cette grille simplifiée est destinée aux conseillers de proximité, dans les coopératives ou dans les Chambres d'Agriculture. Des versions logicielles de cette grille ont été développées : intégration dans le logiciel commercial « Clé de Sol » et dans le service en ligne Plani-LIS d'ARVALIS.

⁸ Possibilité de réaliser une impasse de fertilisation, c'est à dire de ne pas fertiliser lorsque le sol est correctement pourvu.

⁹ Laurent F., Colomb B., Plet P. 1993. Questions nouvelles, nouvelles normes. *Perspectives Agricoles* n°181 – 28-32.

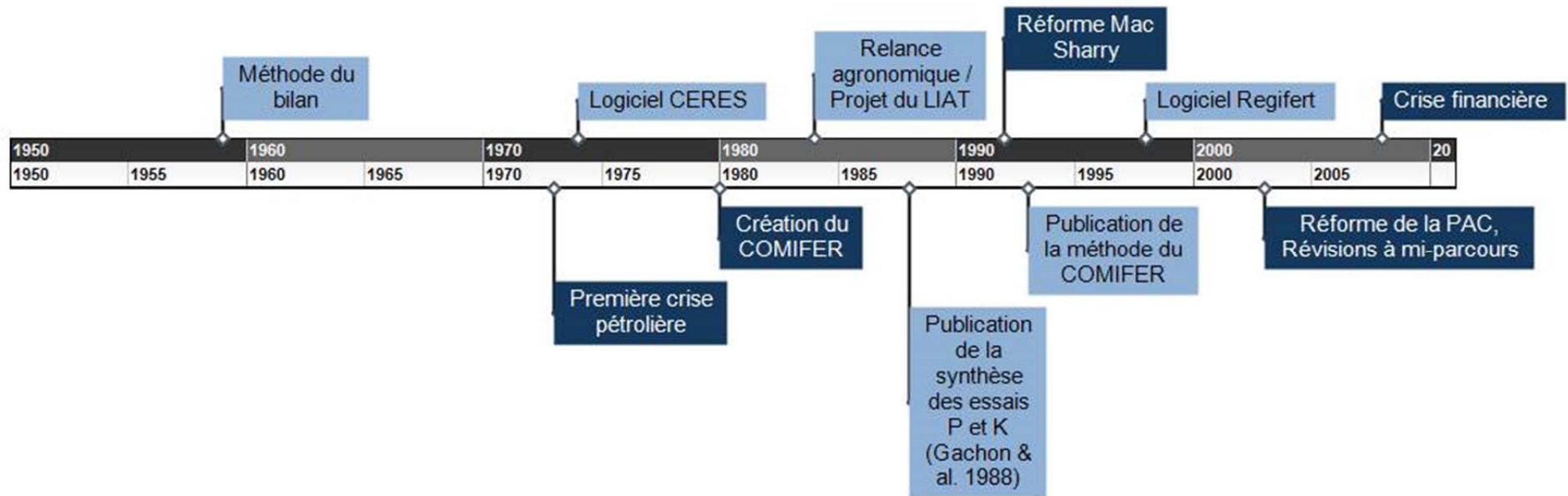
¹⁰ COMIFER, 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. 28 pages.

COMIFER, 1995. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures (1995), 28p.

¹¹ DENOROY P., DUBRULLE P., VILETTE C., COLOMB B., FAYET G., SCHOESER M., MARIN-LAFLECHE A., PELLERIN F., PELLERIN S., BOIFFIN J., 2004. REGIFERT, Interpréter les résultats des analyses de terre. Coll. Techniques et Pratiques, INRA éditions, Paris, 132p.

¹² En outre, le logiciel Régifert prend en compte un spectre plus large d'éléments nutritifs : P, K, Mg et différents oligo-éléments (B, Zn, Cu, Mn).

Chronologie sur la fertilisation P&K



Légende

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

Faits observables concernant la contribution de l'INRA dans le chemin d'impact

La contribution de l'INRA se manifeste de plusieurs façons complémentaires :

- La production de connaissances fondamentales sur la biodisponibilité et sur l'absorption de P et K. Ces connaissances sont publiées dans des revues scientifiques nationales et internationales. Elles ont été le fondement de la production de connaissances actionnables ;
- La production de connaissances actionnables. Elles sont diverses et résident dans plusieurs éléments essentiels : (i) la production de valeurs de référence concernant différentes situations pédoclimatiques et différentes espèces, résultant d'essais de longue durée (réalisés par l'INRA et par d'autres acteurs) ; (ii) la synthèse analytique de ces essais qui permet de concevoir des règles de décision pour la fertilisation, fondées sur des valeurs seuil (en collaboration avec les instituts techniques et certains laboratoires d'analyse) ; (iii) la conception du logiciel Régifert® d'aide à la décision pour la fertilisation de différents éléments nutritifs P, K, Mg et différents oligo-éléments, adaptable aux différentes situations régionales (iv) la conception d'une version simplifiée de ces règles de décision diffusée par le COMIFER. Ces productions se traduisent donc par des sorties opérationnelles très diverses : articles scientifiques, articles dans des revues de vulgarisation, bases de données, guide de fertilisation, logiciel. Ces sorties opérationnelles n'ont pas fait l'objet de protection par brevet ;
- L'INRA joue également un rôle essentiel dans la coordination des acteurs : participation active aux activités du COMIFER, animation scientifique du GIS puis du RMT Fertilisation et Environnement.

L'impact effectif des recherches de l'INRA en termes de pratique de fertilisation se réalise au travers des deux outils complémentaires :

- la méthode COMIFER, méthode simplifiée, qui vise les conseillers de proximité. Elle est adoptée par le COMIFER comme la méthode de référence pour la fertilisation pour P et K. La méthode est intégrée dans différents logiciels diffusés par des entreprises ou par des instituts techniques (Arvalis) ;
- le logiciel Régifert®, utilisé par les laboratoires d'analyse de sols et par certaines grandes coopératives. On estime que jusqu'à 20% des analyses de terre ont été interprétées en utilisant ce logiciel.

La complémentarité des deux instruments a assuré une très large diffusion à la nouvelle approche de la fertilisation P/K. Variables selon les situations, les préconisations de Régifert® sont en général 2 fois moins élevées que celles du logiciel de la génération précédente –CERES¹³. La méthode COMIFER et Régifert® ont *in fine* vulgarisé chez les techniciens, puis chez les agriculteurs, un nouveau mode de raisonnement de la fertilisation davantage fondé sur les besoins de la culture, et légitimant l'impasse lorsque le sol est bien pourvu.

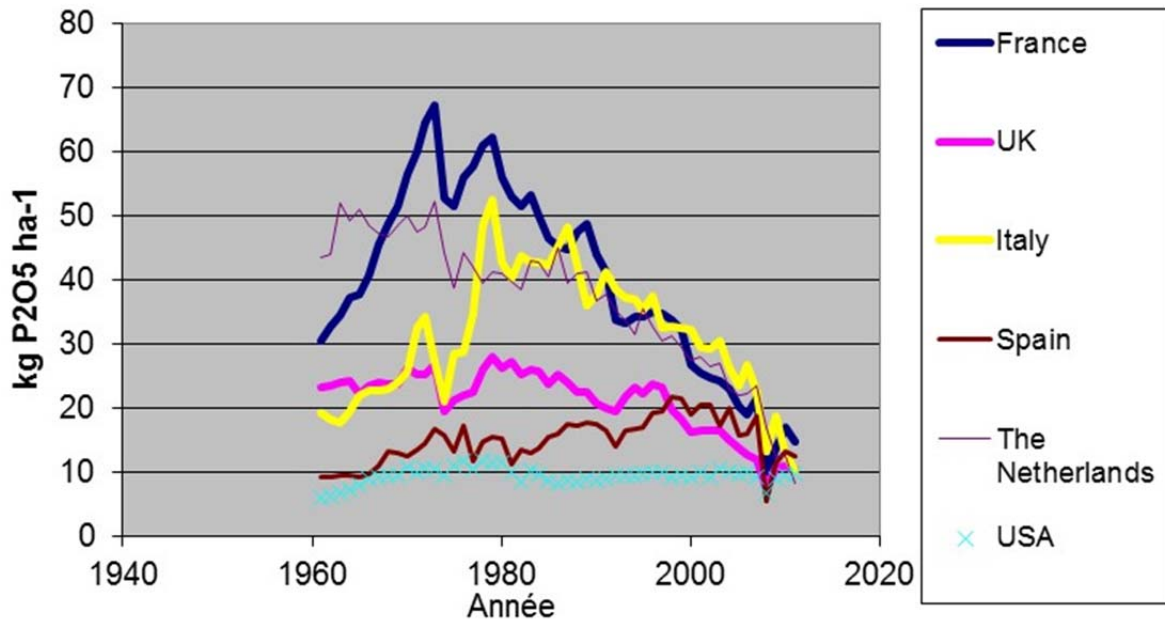
Ce mouvement a accompagné des changements de comportement des agriculteurs qui s'expliquent par des raisons économiques. Alors que les agriculteurs français ont très fortement augmenté les quantités de P et K par hectare après la seconde guerre mondiale, la tendance s'inverse au début des années 1970 du fait de la crise du pétrole et des matières premières. La désintensification raisonnée conduite depuis 40 ans pour le phosphore et le potassium a permis de réduire considérablement les quantités utilisées sans perte de rendement, pour atteindre aujourd'hui des apports de l'ordre de 10-15 kg de P/ha, compensant à peu près les exportations (si on ajoute les apports organiques).

Si l'on compare la France à d'autres pays, il apparaît aujourd'hui que la plupart des pays convergent vers ce niveau de compensation des exportations. La France présente cependant la plus forte diminution. En effet la France est le pays qui a connu, dans les années 1970-1980, le niveau d'intensification le plus élevé, ce qui

¹³ PELLERIN F., PELLERIN S., VILETTE C., BOIFFIN J., 2000. Evolution du raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures. Etude par simulation de l'évolution des préconisations de fumure sur un échantillon test représentatif des sols et des successions de culture du Nord du Bassin Parisien. Etude et Gestion des Sols 7, 53-71.

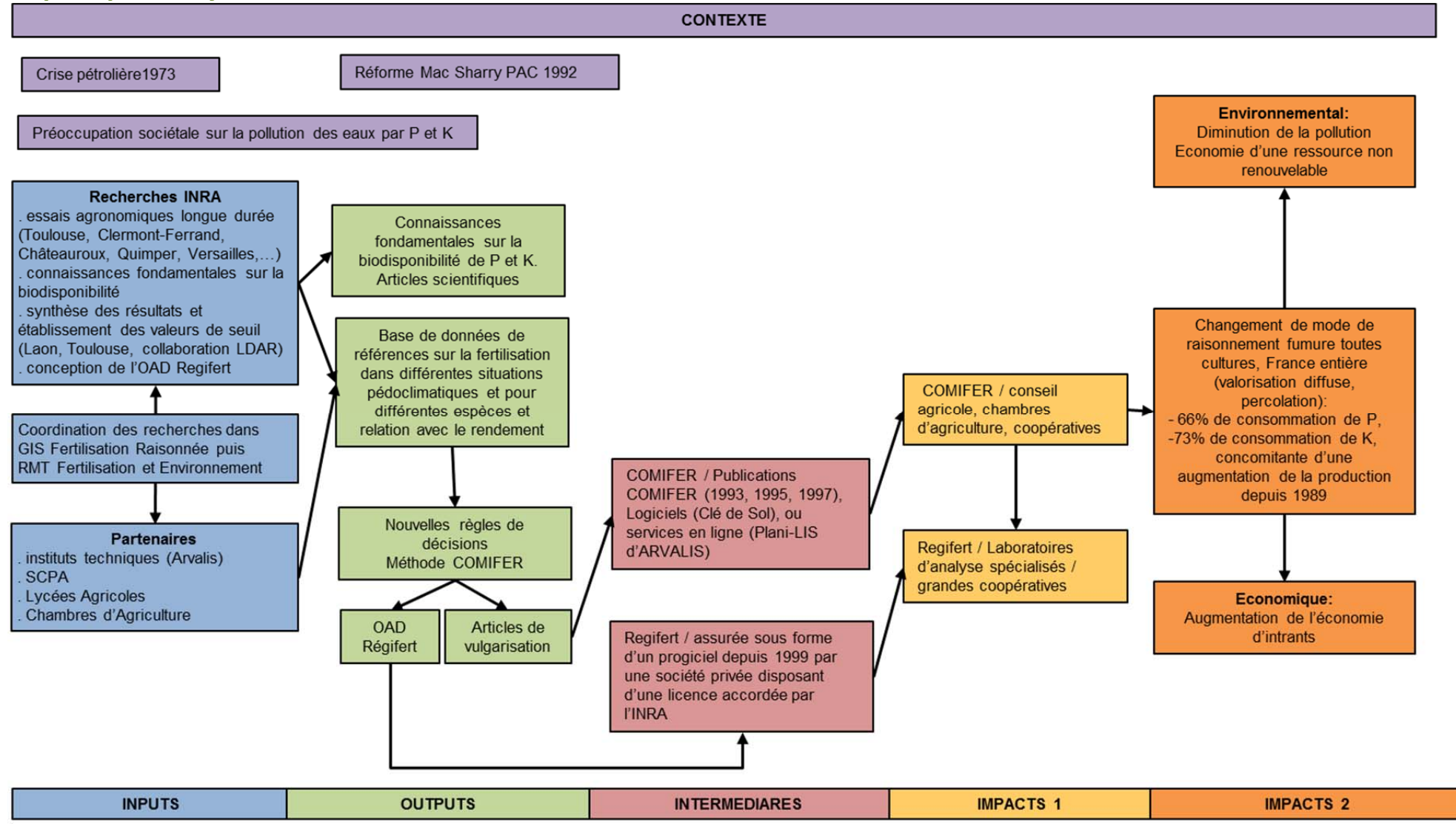
s'explique au moins en partie par un effet de structure¹⁴. Compte tenu de l'histoire des usages et des structures, il y avait donc une situation spécifique française à accompagner pour la modification des pratiques de fertilisation. Les nouvelles préconisations, qui allaient dans le sens de ce qu'attendaient les agriculteurs – mais pas nécessairement les producteurs et distributeurs d'engrais-, ont permis de sécuriser ces baisses de fertilisation par des outils de gestion des impasses et de réduction des doses. De ce point de vue, la contribution de l'INRA, et du département EA en particulier, s'est avérée essentielle.

Figure 3 : Fertilisation en phosphore d'origine minérale (en P2O5/ha) dans 5 pays européens et aux USA



¹⁴ Le niveau moyen de fertilisation d'un pays dépend de la distribution des cultures. Par exemple, des pays à forte proportion de prairies permanentes ou cultures conduites de façon extensive (Etats-Unis et à l'Espagne) auront un niveau moyen de fertilisation moins élevé. En toute rigueur, une comparaison internationale devrait prendre en compte ces effets de structure.

Impact pathway de la fertilisation P&K



Evolution de la fertilisation azotée (N)

Inputs et situation productive : historique des connaissances scientifiques mobilisées sur l'azote

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.

Jean Hébert, directeur de la Station Agronomique de l'Aisne (Laon) invente la méthode du bilan azoté en 1959¹⁵. Cette méthode ne s'est pas imposée facilement¹⁶ mais elle reste encore aujourd'hui fondamentale pour raisonner la fertilisation azotée. Les recherches sur l'azote ont été conduites dans différentes stations (notamment Chalons sur Marne, Laon, Lusignan, Quimper) et se sont concentrées progressivement sur deux sites principaux :

- Les recherches de l'unité d'agronomie de Laon qui s'intéressent essentiellement à la dynamique de l'azote dans le sol progressent beaucoup dans les années 1970/80 avec l'adoption des méthodes isotopiques (¹⁵N) qui permet de suivre les dynamiques de transformation et migration de l'azote de l'engrais dans le sol et dans la plante et ainsi d'affiner l'étude des cinétiques de minéralisation et d'absorption et de comprendre les déterminants de l'utilisation de l'azote de l'engrais par les couverts. L'accent est mis notamment sur la dynamique de l'organisation microbienne de l'azote, qui nécessite de coupler les cycles de l'azote et du carbone pour mieux en comprendre les déterminismes.
- les recherches de l'unité d'agronomie de Grignon abordent la fertilisation à partir de l'analyse de l'élaboration du rendement et de la qualité des produits, et donc des besoins en azote de la culture. Ces recherches utilisent les méthodes d'écophysiologie, en particulier les travaux conduits à l'unité d'agronomie de Lusignan, et s'intéressent au fonctionnement de la plante carencée et aux déterminants de la qualité des produits récoltés.

Outputs : des concepts et des OAD au service de la diffusion de cette nouvelle approche

Ces recherches conduisent à formuler de nouveaux concepts qui enrichissent considérablement les méthodes de calcul prévisionnel de la fertilisation azotée (dont la méthode du bilan) :

- *la dynamique de minéralisation de l'azote dans le sol* : l'introduction du concept de Jours Normalisés (JN)¹⁷ permet d'adopter une démarche prévisionnelle dynamique pour la minéralisation de différentes sources d'azote (humus, résidus de culture, produits organiques) en tenant compte au champ (ou au laboratoire) des variations climatiques (température et humidité du sol). Les JN sont définis comme les jours où la température moyenne est égale à une température de référence (15°C le plus souvent) et l'humidité de référence est celle de la capacité au champ. Cette approche sera intégrée rapidement dans des outils de calcul (Lixim, 1999 ; Azofert 2004) ce qui contribuera à sa diffusion large ;
- *l'état nutritionnel azoté d'une culture*, défini par l'Indice de Nutrition Azotée (INN) par rapport à une teneur en azote de référence. Développé à partir des travaux initiaux de Lusignan sur cultures fourragères¹⁸, ce concept sera progressivement étendu aux grandes cultures (blé, maïs, pommes de terre, etc...). L'INN permet de déterminer, en cours de cycle de végétation, l'état carencé ou non carencé en azote d'un peuplement végétal. L'adoption de ce concept générera alors toute une série de travaux plus appliqués,

¹⁵ HEBERT J., 1959. La fumure azotée, Bulletin de l'AFES, pp 232-257

¹⁶ Voir sur ce point JL Julien (2014, p.98 s.) qui considère que la pertinence et de l'opérationnalité de la méthode du bilan ne seront acceptées qu'une quarantaine d'années après sa formulation, lors du colloque sur la fertilisation raisonnée organisé en 1987 à l'Académie d'Agriculture avec le COMIFER.

¹⁷ ANDREN O., PAUSTIAN K., 1987. Barley straw decomposition in the field. A comparison of models. Ecology 68, 1190-2000.

¹⁸ LEMAIRE G, SALETTE J. 1981 The variation of nitrogen-content during the growth of grasses – A dilution equation. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, 292, 14, 875-878.

visant à mettre au point des indicateurs « plante » de cet état nutritionnel qui permettent de mieux gérer la fertilisation azotée en cours de culture.

En 1996, face à une qualité moyenne des blés français très médiocre, qui de surcroît diminuait depuis plus de 10 ans, l'INRA a contribué, avec ses partenaires, à proposer des méthodes permettant de favoriser une teneur en protéines plus élevée, tout en réduisant les risques de pertes d'azote vers l'environnement. Les travaux de l'INRA sur les faibles coefficients d'utilisation de l'azote de l'engrais (estimés par les CAU et CRU) en début de cycle et en sortie hiver¹⁹, ainsi que ceux concernant les tolérances possibles de carences azotées temporaires précoces, menés dans les années 1980-1990 ont conduit à recommander un retard significatif des premiers apports d'azote vers des dates plus tardives, accroissant ainsi l'efficacité d'utilisation de l'engrais. C'est notamment à partir cette période que s'est considérablement développée la pratique du 3^{ème} apport d'azote sur blé, qui vise essentiellement à accroître la teneur en protéine des grains. D'une manière plus générale, la meilleure connaissance de la dynamique des besoins des cultures et de « l'offre en azote » du sol via la minéralisation des différentes sources de matières organiques, a contribué à la démarche d'ajustement des apports (quantitativement et temporellement) au plus près des besoins en azote des cultures. L'utilisation des relations trouvées par Limaux et al. (1999)²⁰ entre vitesse de croissance d'un peuplement de blé au moment des apports et coefficient d'utilisation de l'engrais dans les outils d'aide à la décision (OAD) en est l'illustration.

L'INRA a contribué aussi à l'évolution des pratiques de fertilisation azotée par la conception d'OAD, souvent en partenariat avec les instituts techniques. Les principaux OAD sont les suivants :

- outils de raisonnement basés sur le bilan azoté prévisionnel :
 - Azobil créé en 1990 sur la base d'une méthode de bilan azoté statique et paramétré pour 26 cultures annuelles (pour la version de 1990);
 - Azodyn (fin des années 1990) : prévision des performances (rendement, pertes N, teneur en Protéines) du blé et du colza pour différentes stratégies de fractionnement de la fertilisation azotée. Ce logiciel est utilisable en agriculture conventionnelle et biologique ;
 - AzoFert (2003) : repose sur une approche dynamique des processus de minéralisation de l'azote des différents « termes » du bilan, en utilisant les jours normalisés (JN), ce qui permet de tenir compte du climat (passé et à venir) de la parcelle. Il réalise le calcul prévisionnel du bilan pour une cinquantaine de cultures annuelles pour lesquelles les besoins en azote totaux ont été paramétrés.
- outils de pilotage en cours du cycle végétatif qui permettent d'ajuster la stratégie de fertilisation en fonction des conditions climatiques de la campagne et de leurs incidences sur la croissance des plantes et la disponibilité du sol :
 - Jubil (1993) qui complète le bilan prévisionnel par le dosage de la teneur en nitrate du jus de base de tige pour estimer le niveau d'alimentation de la plante et détecter les carences azotées;
 - Témoins double-densité (TDD) (2001) dont le principe est d'accroître, en semant une double densité sur une toute petite zone de la parcelle, les besoins précoces du peuplement, et donc de détecter par observation visuelle du couvert la date d'entrée en carence de cette zone, indicatrice d'une entrée en carence proche du reste de la parcelle.
 - Télédétection par données satellitaires du statut azoté des couverts par mesures de réflectance

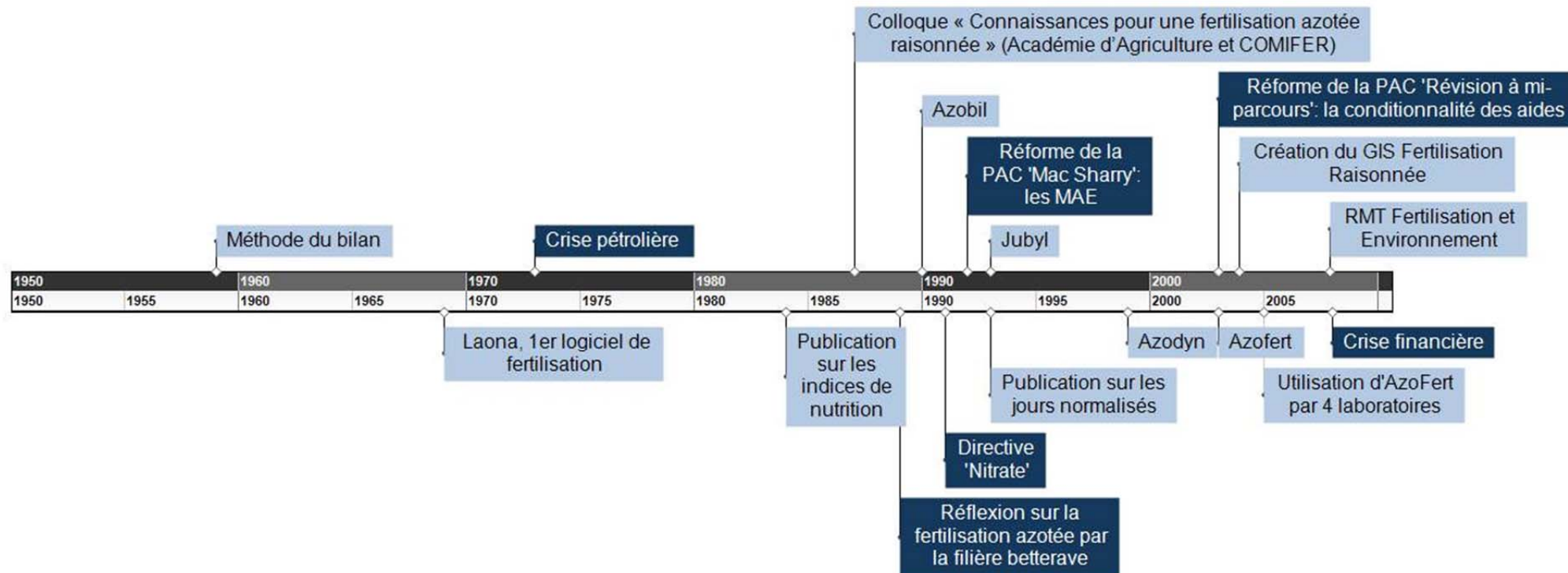
Dans les années 2000, les compétences en agronomie de l'unité INRA de Laon sont complétées avec l'arrivée d'une chercheuse spécialisée en télédétection. Les données satellitaires permettent, moyennant un calage au sol, d'estimer l'indice foliaire, la biomasse aérienne et l'état nutritionnel azoté. Couplées aux études réalisées à Grignon sur la nutrition des plantes, ces recherches ont contribué à la production de l'outil de pilotage des cultures FarmStar, conçu par Arvalis et par le CETIOM (utilisé en 2013 sur plus de 600 000 ha, sur blé, orge et colza). En 2012, en collaboration avec les instituts techniques, l'INRA a créé l'UMT CAPTE

¹⁹ MACHET J.M., PIERRE D., RECOUS S., REMY J.C., 1987. Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France 73, 3, 39-55

²⁰ LIMAUX F., RECOUS S., MEYNARD J-M., GUCKERT A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser-N application and fate of fertiliser-N applied to winter wheat. Plant and Soil 214, 49-59.

(Capteurs et télédétection pour la caractérisation de l'état et du fonctionnement des cultures) afin de développer ce type d'approches à la fois sur le plan scientifique et sur le plan technologique.

Chronologie sur la fertilisation azotée (N)



Légende

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

Faits observables concernant la contribution de l'INRA dans le chemin d'impact

La contribution de l'INRA peut être tout d'abord analysée en suivant les trajectoires des deux concepts évoqués précédemment (JN et INN). Dans le tableau 1 ci-dessous, nous distinguons 5 étapes, des premières publications scientifiques à l'utilisation banalisée :

- première publication où le concept est proposé : dans le cas de l'INN, il s'agit de chercheurs de l'INRA, dans le cas des JN, d'une publication de deux chercheurs étrangers (suédois et américains) dont le concept est alors utilisé dans le cadre d'une thèse réalisée à l'Inra ;
- recherches conduites par l'INRA qui visent à appliquer le concept pour différentes cultures et dans différentes situations (les références sont données à titre indicatif ; elles sont beaucoup plus nombreuses en réalité) ;
- en complément de ces recherches applicatives, les chercheurs et ingénieurs impliqués ont conçu des outils d'aide à la décision, de façon à faire la preuve de l'utilité des concepts proposés et à fournir des outils utilisables par les agriculteurs ou par le conseil technique (Cf. tableau et paragraphe précédent)
- l'intégration de ces concepts dans les guides COMIFER constitue un marqueur essentiel de succès car ce comité publie les méthodes de référence ;
- la référence à ces concepts dans des articles de vulgarisation (la revue Perspectives Agricoles a été choisie car elle couvre toute la période, elle est éditée sous l'égide des instituts techniques et elle a réalisé régulièrement des dossiers de référence sur la fertilisation).

Tableau 1 : Trajectoire des concepts sur la fertilisation azotée, des premières publications à l'utilisation banalisée

	1 ^{ère} publication	Utilisation dans des recherches de l'INRA	Intégration dans des OAD INRA	Référence Guide COMIFER	Référence dans Perspectives Agricoles
I NN	Lemaire, Salette (1981) <i>CR Académie des Sciences</i>	Gonzales-Montaner (1987) <i>Thèse</i> , Justes et al. (1994) <i>Annals of Botany</i> , Jeuffroy, Recous (1999) <i>Eur J of Agronomy</i> , Jeuffroy, Bouchard (1999) <i>Crop Science</i> (...)	JUBIL, 1993 TDD*, 2001 AZODYN, 2004	1996	1987, 1992, 1994, 1996 (Jubil), 1996 (Jubil), 1998, 2000 (PROBLE), 2001 (TDD), 2003 (TDD), 2006 (TDD), 2011
J N	Andren, Paustian (1987), <i>Ecology</i>	Darwis (1993) <i>Thèse</i> , Mary, Recous et al. (1996) <i>Plant and Soil</i> (...) Brisson et al. 1998 (STICS), LIXIM 1999 ; Recous et al., 1999 ; Beaudoin et al., 2005	AZOFERT, 2003	2011 (AZOBIL, AZOFERT) 2013 (AZOFERT)	2004 (LIXIM), 2006 (AZOFERT)

TDD= Témoins Double Densité

Source : S. Recous, document de travail accessible sur le site <http://www6.inra.fr/asirpa>

Au-delà de ces deux exemples, la littérature technique permet d'établir l'influence cruciale des travaux de l'INRA. La plupart des références citées dans les documents techniques (par exemple : Rapport Corpen 1992, Brochures COMIFER 2011 et 2013, Dossiers fertilisation de Perspectives Agricoles) correspondent à des recherches menées par l'INRA.

Ainsi, l'INRA joue un rôle essentiel à différentes étapes du chemin d'impact :

- la production de connaissances fondamentales concernant à la fois la plante et le sol (dynamiques de minéralisation de l'azote et caractérisation des besoins et de la nutrition des plantes). Ces recherches utilisent souvent des techniques avancées (marquage isotopique, modélisation, ...) ;

- l'approfondissement de ces connaissances dans des situations pédoclimatiques différentes et pour les principales cultures concernées. Compte tenu des principales implantations de l'INRA sur la thématique de la fertilisation azotée, les principales espèces travaillées sont le blé et le colza (très peu le maïs par exemple). Ces recherches sont souvent faites en collaboration avec des instituts techniques. Les thèses cofinancées sont l'un des vecteurs importants ; sur la trentaine de thèses touchant à la fertilisation réalisées à l'INRA depuis 1985, 17 ont été réalisées en collaboration, essentiellement avec des instituts techniques (principalement Arvalis)²¹ ;
 - incorporation de ces connaissances dans des outils techniques : les différentes générations d'outils d'aide à la décision;
 - animation des instances de coordination des recherches sur la fertilisation: COMIFER, GIS et RMT *Fertilisation et Environnement*.

La forte relation de l'Unité d'Agronomie de Grignon avec les activités d'enseignement a été essentielle pour la diffusion des nouveaux concepts et des nouvelles approches.

Concernant l'utilisation des OAD, pour Azofert[®] par exemple, on estime que le taux d'utilisation est de 80% pour la betterave et de 10% pour le blé tendre.²² Mais la diffusion des approches et concepts est bien plus importante que celle des outils. Ceci est visible par la fréquence des citations d'AZOFERT, à partir du milieu des années 2000, dans les ouvrages (brochures du COMIFER, guide de la Fertilisation Raisonnée) et articles de la presse agricole. AZOFERT[®] est très souvent cité pour son approche dynamique (ex : minéralisation des produits résiduels organiques –PRO- en fonction de jours normalisés) mais aussi pour sa généralité (références quantitatives pour une large gamme de cultures, de produits résiduels organiques, etc.). La production d'OAD joue un rôle de preuve de concept et peut s'avérer déterminante pour la reprise de ces concepts par les instituts techniques dans leurs propres OAD. Ainsi Arvalis –Institut du Végétal, reprend dans l'outil Ferti-Web, un certain nombre des concepts développés par l'Inra, tout en y apportant sa propre expertise: dynamisation de l'offre du sol (Azofert, Lixim) en utilisant des vitesses de minéralisation potentielles des différentes sources et les jours normalisés ; dynamisation des besoins en azote des cultures (Azodyn) en utilisant les connaissances des besoins en N à satisfaire à la floraison du blé, estimation du recouvrement de l'engrais (CAU) en utilisant les relations entre dates d'apport-vitesses de croissance des peuplements et pertes d'engrais. Les OAD tels que Farmstar et N-testeur, utilisent les relations entre INN et transmittance.

Quels sont les changements de pratiques ?

La fertilisation azotée n'est pas gérée par les agriculteurs comme celle de P et K. En effet, en matière de fertilisation azotée, tout manque pénalise immédiatement les rendements alors que le phosphore et la potasse stockés dans le sol peuvent avoir un effet tampon. Les agriculteurs ont donc une forte aversion contre les risques de carence azotée qui explique une résistance à l'adoption des préconisations des agronomes²³.

Néanmoins, un rapport récent du Conseil Général de l'Agriculture et du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable²⁴ montre que l'on observe, depuis 1990, une baisse de l'utilisation de l'azote en même temps qu'une poursuite de l'augmentation des productions végétales (céréales + colza) (Figure 4).

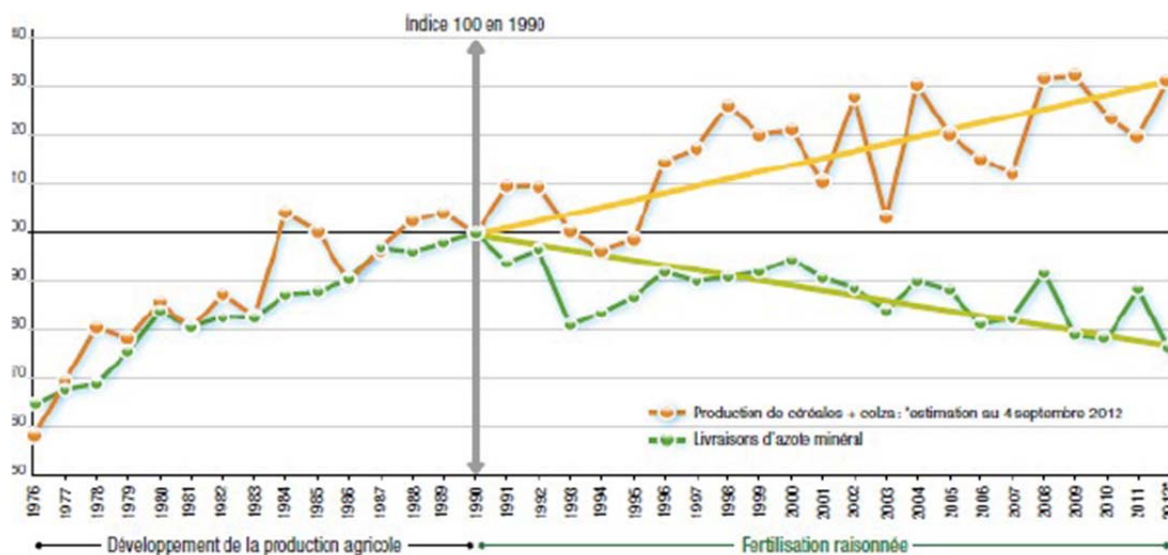
²¹ Cf. document de travail de S. Recous sur le site ASIRPA

²² Cf. étude ASIRPA sur Azofert (<http://www6.inra.fr/asirpa>).

²³ Cerf, M., Meynard, J.M. (2006). « Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception », *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 14, 19-29.

²⁴ Balny, P., Delcour, D., Guillet, M. Rathouis, P., Roussel, F. (2013). Plan d'action relatif à une meilleure utilisation de l'azote en agriculture, Paris : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-Alimentaire et de la Forêt.

Figure 4 : Evolution de la livraison d'engrais azoté et de la production de céréales



Cette baisse s'explique par l'adoption par les agriculteurs de pratiques de fertilisation raisonnées qui permettent d'adapter les apports aux situations locales et aux rendements attendus et de les rectifier en cours de campagne²⁵ :

- à partir des années 2000, les apports déterminés selon une dose « habituelle » empirique (notamment sans calcul prévisionnel basé sur un objectif de rendement et/ou un reliquat d'azote minéral et bien sûr sans outil de pilotage) représentent seulement 8 % des surfaces fertilisées contre 43 % en 1994 ;
- le fractionnement des apports d'azote est généralisé pour le blé : près de 71 % des surfaces en blé tendre bénéficient en 2006 d'au moins trois apports d'azote minéral dans la saison (contre seulement 26% des surfaces en 1994).

Cela témoigne de l'adoption des préconisations auxquelles l'INRA a fortement contribué avec ses partenaires du développement.

In fine, d'après l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA), l'effet combiné de l'augmentation de la production et de la baisse de l'utilisation d'azote, se traduit pour la culture du blé par un stock fin de campagne en diminution de 50% entre 1988/89 et 2012/2013, passant de 42kg/ha, à moins de 20 kg/ha.²⁶

Ainsi, l'effet combiné des changements de contexte économique et politique et des possibilités d'innovation liées aux connaissances et aux instruments de l'INRA a permis un changement des pratiques qui va bien au-delà de l'usage des instruments de l'INRA.

Quels impacts sur les politiques publiques ?

Dans le cadre du contentieux entre la France et la Communauté européenne sur l'application de la directive nitrate, se traduisant par la mise en place des groupes régionaux d'expertise nitrate (GREN) à partir de 2011, l'INRA et ses partenaires (au sein du RMT *Fertilisation & Environnement* et du COMIFER) prennent l'initiative en 2011 de mobiliser l'expertise scientifique et technique sur la fertilisation azotée et d'assurer un appui technique aux Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement sur ce dossier. Il s'agit notamment d'accélérer la mise en cohérence et la mise à disposition, à l'échelle nationale, de données, références, voire règles de décision, pour les déclinaisons régionales de la méthode du bilan²⁷ et de proposer une méthodologie

²⁵ Agreste Primeur, n°291, octobre 2012.

²⁶ D'après les données de l'UNIFA et UNIFA (2012). *Eléments des bilans soufre et azote et indicateurs d'efficacité de l'azote minéral sur blé tendre*, <http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>.

²⁷ Méthode de référence choisie par la France pour le calcul prévisionnel de la fertilisation azotée

d'évaluation des OAD pour la fertilisation azotée. L'INRA, avec J-M Machet, S. Recous et J. Boiffin, participe à la conception et à la réalisation de cet appui. Une vingtaine de scientifiques de l'INRA participent aussi en tant qu'experts dans les GREN de leur région, sur la quasi-totalité des 20 régions concernées.

A partir des années 2010, l'INRA répond aussi aux sollicitations des pouvoirs publics, par la réalisation de nombreuses expertises et études commanditées par les ministères et des agences telle que l'ADEME sur des thématiques en lien très étroit avec la gestion de la fertilisation des cultures, les possibilités de réduire les intrants minéraux et de minimiser les impacts environnementaux de sa gestion, notamment : (i) Connaissances sur les flux d'azote et flux associés dans les élevages (2012) ; (ii) Gestion de l'interculture au moyen de Cultures Intermédiaires " (2012), (iii) Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? (2013) ; (iv) Les Impacts agronomiques, environnementaux et socio-économiques de la valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usages agricole ou forestier (2014)

Impact pathway de la fertilisation azotée

