



**HAL**  
open science

## Voies d'amélioration des impacts environnementaux des systèmes céréaliers : une première synthèse à partir des travaux de l'INRA

Joel Abecassis, Michel Bertrand, Sylvie Bonny, Charles-Antoine Dedryver, Martine Georget, Jean Marie Nolot, Bernard Rolland, Michel Rousset

### ► To cite this version:

Joel Abecassis, Michel Bertrand, Sylvie Bonny, Charles-Antoine Dedryver, Martine Georget, et al.. Voies d'amélioration des impacts environnementaux des systèmes céréaliers : une première synthèse à partir des travaux de l'INRA. *Innovations Agronomiques*, 2011, 12, pp.53-72. 10.17180/jtfx-v048 . hal-01018980

**HAL Id: hal-01018980**

**<https://hal.science/hal-01018980>**

Submitted on 10 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Voies d'amélioration des impacts environnementaux des systèmes céréaliers : une première synthèse à partir des travaux de l'INRA

Abecassis J.<sup>1</sup>, Bertrand M.<sup>2</sup>, Bonny S.<sup>3</sup>, Dedryver C.A.<sup>4</sup>, Georget M.<sup>5</sup>, Nolot J.M.<sup>6</sup>, Rolland B.<sup>7</sup>,  
Rousset M.<sup>8</sup>

<sup>1</sup> : INRA, UMR IATE - INRA Montpellier, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier

<sup>2</sup> : INRA, UMR Agronomie – INRA - AgroParisTech Grignon, 78850 Grignon

<sup>3</sup> : INRA, UMR Economie Publique - INRA Grignon, 78850 Grignon

<sup>4</sup> : INRA, UMR BIO3P, Domaine de la Motte au Vicomte, BP 35327, 35653 Le Rheu cedex

<sup>5</sup> : INRA, MCAPA, 147 rue de l'Université – 75338 Paris cedex 07

<sup>6</sup> : INRA, UMR AGIR –INRA Toulouse, chemin de Borde-Rouge, 31326 Castanet Tolosan Cedex

<sup>7</sup> : INRA, UMR APBV – INRA Rennes, 35653 Le Rheu cedex

<sup>8</sup> : INRA, UMR Génétique végétale, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette

Correspondance : [abecassi@supagro.inra.fr](mailto:abecassi@supagro.inra.fr)

### Résumé

Le contexte actuel requiert une meilleure harmonie entre l'agriculture et l'environnement, aussi la recherche agronomique est-elle souvent questionnée sur ses investigations en la matière. Cet article présente le résultat d'un travail d'inventaire portant sur des voies d'amélioration des impacts environnementaux en systèmes céréaliers. Une soixantaine de travaux conduits par l'INRA en relation avec ses partenaires du monde agricole ont été répertoriés et classés en trois grands domaines : amélioration de l'efficacité des intrants, substitution d'un intrant par un autre, reconception des systèmes de production. L'inventaire fait apparaître trois grands champs de recherche et d'innovations. En premier lieu, l'amélioration variétale, et en ce domaine l'importance de la collecte, conservation et description des ressources génétiques grâce aux apports des outils d'analyse du génome est soulignée. En deuxième lieu, les démarches systémiques prenant en compte les divers facteurs de production, dans le temps et dans l'espace et mobilisant de nombreux champs disciplinaires. Enfin, les outils d'évaluation des systèmes de production et d'aide à la décision, instruments importants pour la conception ou l'expérimentation de systèmes de production innovants. Cependant, divers domaines essentiels comme les approches transversales (sols, biodiversité, localisation des productions) et la durabilité économique et sociale devront être traités plus en détail ; ce premier inventaire ne cherchait pas à être exhaustif.

**Mots-clés:** Céréales, blé, maïs, environnement, impact environnemental, intrant, réduction des intrants, fertilisation, pesticide, eau, amélioration génétique, ressource génétique, agroécologie, agronomie, écophysiologie, approche systémique, agriculteur, système de production, rejet, gaz à effet de serre, outil d'aide à la décision, innovation, protection intégrée des cultures

### Abstract: Possibilities to improve environmental impacts of cereal production systems: a first synthesis from Inra research works

The present context requires a better harmony between agriculture and environment, and thus agronomic research was questioned on this topic. The present paper gives the results of an inventory of possibilities to improve environmental impacts of cereal production systems. About 60 research works carried out by Inra with its professional partners was collected and categorised in three domains: input efficiency improvement, substitution of one input by another, reconception of production systems. The inventory showed three main filed of research and innovations. The first one is the variety breeding, where collection, conservation and description of genetic resources thanks to genomic tools is

underlined. Secondly, systemic approaches taking into account various production factors in time and space and mobilising numerous disciplines. At last, tools for evaluation of production systems and decision tool kits are important instruments for conceiving and testing innovative production systems. However, various essential domains such as crossed approaches (soils, biodiversity and production localisation) and economic and social sustainability will have to be analysed in detail. This first inventory is not exhaustive at this stage.

**Keywords:** Cereals, wheat, maize, environment, environmental impact, input, input reduction, fertilization, pesticide, water, plant breeding, genetic resources, agroecology, agronomy, ecophysiology, systemic approach, farmer, production system, greenhouse gas, decision-making tool, innovation, integrated pest management

## Introduction

Quelles sont les recherches et les innovations proposées par l'INRA pour améliorer significativement les impacts environnementaux des exploitations agricoles ? C'est à cette question que les groupes Filières de l'INRA - collectif de chercheurs et d'ingénieurs de multiples disciplines – ont été conviés à répondre. La place prépondérante de la production céréalière en France, plus de 70 millions de tonnes sur 9,4 millions d'hectares, soit près de la moitié des surfaces labourables (Agreste, chiffre 2009), renforce l'acuité de la question.

Un premier inventaire conduit par le groupe Filière Céréales<sup>1</sup> a permis d'identifier une soixantaine de voies d'amélioration des performances environnementales des systèmes de production céréaliers. Près de la moitié des solutions recensées sont d'ores et déjà opérationnelles -utilisées par des conseillers, des agriculteurs, des semenciers lorsqu'il s'agit d'innovations dans le domaine génétique- ou potentiellement utilisables, les autres sont en phase expérimentale ou encore en phase de recherche.

Dans tous les cas, si l'INRA a joué un rôle clé, les travaux ont été conduits en relation étroite avec ses partenaires, instituts techniques, chambres d'agriculture et réseaux d'agriculteurs, entreprises du monde agricole qui ont, selon les thématiques, participé aux recherches et/ou à leur développement.

Les voies d'amélioration envisagées peuvent concerner divers systèmes de production : système intensif irrigué ou non, système de culture sous contraintes, non irrigué, moins intensif, système de polyculture élevage, agriculture biologique. Toute solution proposée peut avoir un impact plus ou moins important selon le système auquel on se réfère et le contexte géographique considéré.

Parmi les voies d'amélioration recensées à ce jour, on note que si nombre d'entre elles concernent des composantes de l'itinéraire technique : réduction de l'usage des pesticides, réduction de la fertilisation azotée, économie d'eau... -on parle alors d'approches factorielles-, d'autres s'orientent davantage vers des propositions de changement plus radical allant jusqu'à une reconception des systèmes de production -on parle alors d'approches systémiques-. Elles visent principalement la réduction des rejets azotés et de pesticides, et une économie d'eau ; indirectement des effets bénéfiques sont ressentis en termes de consommation d'énergie ou d'émission de gaz à effet de serre (moindre utilisation d'engrais azotés) ou encore en termes de biodiversité ou de préservation des paysages (diversification des cultures).

Une synthèse de ce premier inventaire est ici présentée. Dans une première partie, sont exposées les voies visant l'amélioration de l'efficacité des intrants ou conduisant à la substitution d'un intrant par un

---

<sup>1</sup> Composition du groupe filière Céréales : Joël Abecassis, Michel Rousset, Michel Bertrand, Jean-Marie Nolot, Bernard Rolland, Sylvie Bonny, Charles-Antoine Dedryver, Christine Jez, Michel Lessire, Jean-Louis Rastoin, Bernard Aizac.

autre. La seconde partie est consacrée à la reconception et l'évaluation des systèmes de production. Quatre exemples marquants donneront ensuite un aperçu de ces deux approches et des résultats obtenus. Enfin, les limites de ce travail et les premiers enseignements que l'on peut en tirer seront abordés dans une dernière partie.

## **1. Amélioration de l'efficacité des intrants, baisse des niveaux d'intrants ou substitution d'un intrant par un autre**

L'élaboration du rendement et de la qualité des céréales à paille pour produire un grain conforme à la demande des utilisateurs nécessite l'apport de plusieurs intrants : les semences, les engrais minéraux, les pesticides, éventuellement les régulateurs de croissance et l'eau (irrigation). Néanmoins, les contraintes économiques (agir sur les charges puisqu'on ne peut agir sur les prix) et environnementales (réduction programmée de l'utilisation des pesticides, limitation des GES<sup>2</sup>) actuelles nécessitent de valoriser et d'économiser au mieux ces intrants. L'INRA développe, en collaboration avec ses partenaires, des programmes visant à améliorer leur efficacité, à diminuer leur usage voire à abandonner certains d'entre eux.

Dans cette partie, nous décrivons les démarches factorielles relevant principalement de l'écophysiologie, la génétique et la sélection, ou encore l'agronomie.

Les principaux intrants concernés sont les engrais minéraux au premier rang desquels l'azote, les pesticides (fongicides, insecticides, herbicides), les régulateurs de croissance (ou « raccourcisseurs ») et l'eau. L'amélioration de l'efficacité des intrants passe par ailleurs (1) par une meilleure adaptation de la plante aux facteurs climatiques pouvant provoquer des stress dommageables à son fonctionnement, tels que les températures excessives (froid et chaleur), ainsi que par (2) l'optimisation de leur utilisation par le développement d'outils d'aide à la décision valorisant les connaissances biologiques acquises.

### *1.1 Pour une réduction ou une optimisation de l'usage des engrais minéraux*

Les apports d'engrais sont destinés à compléter la fourniture du sol en éléments minéraux pour répondre aux besoins de la plante et éviter ou limiter les périodes de carence. Tous les systèmes de production sont concernés : agriculture intensive, agriculture avec intrants réduits, jusqu'à l'agriculture biologique. Mais la fertilisation ne doit pas engendrer de pertes d'éléments à l'origine de pollutions, en particulier par lixiviation des nitrates vers les nappes phréatiques. Toute consommation d'engrais minéraux joue par ailleurs fortement sur la consommation d'énergie fossile et l'émission de gaz à effet de serre lors de la synthèse des engrais (CO<sub>2</sub>) voire en cas de dénitrification (N<sub>2</sub>O).

#### **1.1.1 Prédire les flux d'azote et caractériser les peuplements**

Le raisonnement de la dose et du mode d'apports des engrais azotés nécessite d'abord de prévoir les flux d'azote, en particulier l'importance de la minéralisation de la matière organique, et de quantifier les besoins du peuplement végétal en déterminant les situations de carence. Un modèle de prédiction de la minéralisation de la matière organique a été bâti, qui calcule la fourniture moyenne du sol en azote à partir du type de sol, de la teneur en matière organique et du climat. Le suivi de la teneur en nitrate du jus de base de tige permet de situer l'entrée en carence du peuplement et de compléter si nécessaire la fertilisation azotée.

---

<sup>2</sup> GES : gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>...)

De même, la surveillance de l'entrée en carence (jaunissement) d'une bande de blé semée à double densité permet d'accroître l'efficacité d'un apport azoté au début montaison en le déclenchant au plus près des besoins de la culture.

### **1.1.2 Création de variétés utilisant mieux l'azote**

L'augmentation de l'absorption de l'azote du sol par le matériel végétal permet également une réduction des apports et des risques de perte. On a ainsi recherché des variétés de blé tendre, de blé dur et de maïs montrant une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote et on a identifié des caractères et des gènes liés à cette efficacité. Cette variabilité génétique pour l'efficacité d'utilisation de l'azote s'exprime sur le rendement en grain ou la teneur en protéines (paramètre essentiel qui détermine la qualité du grain de blé dur pour les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> transformations). L'objectif du programme de recherche est l'identification des bases éco-physiologiques (deux phases sont principalement considérées : les phases d'assimilation de l'azote du sol et les phases de remobilisation de cet azote vers le compartiment reproducteur en post-floraison) et génétiques qui déterminent ces différences afin de proposer des outils d'aide à la sélection et au choix de la variété. Une meilleure efficacité de l'assimilation de l'azote peut provenir à la fois d'un meilleur fonctionnement des parties aériennes (biomasse et teneur en azote foliaire) et racinaires (ancrage, vitesse de croissance et profondeur d'enracinement).

Des gènes candidats pouvant être impliqués dans l'utilisation de l'azote ont été identifiés et leur validation fonctionnelle est en cours. Parmi ces gènes, se trouvent en particulier ceux codant pour la Glutamine synthétase (GS) ; chez le maïs, 4 locus semblent jouer un rôle important dans l'absorption et l'utilisation métabolique de l'azote. D'où les deux solutions envisageables : 1) utiliser la variation quantitative de ces caractères en sélection conventionnelle, 2) utiliser la transgénèse pour augmenter par surexpression l'efficacité de la GS. L'INRA travaille dès à présent à l'intégration des résultats dans les programmes de création variétale.

## *1.2 Pour une réduction de l'usage des pesticides*

### **1.2.1 Des outils d'aide à la décision (OAD)**

Deux outils d'aide à la décision, Colibri® et Aphi-net® mis au point par l'INRA<sup>3</sup>, permettent de limiter les traitements insecticides contre les pucerons des céréales aux cas où ils sont réellement nécessaires. Ils sont basés sur l'analyse du rapport financier à l'hectare avec ou sans traitement, en fonction de la probabilité de dégâts. L'un d'entre eux (Aphi-net®) permet de réduire le coût de gestion d'une maladie transmise par les pucerons (JNO) et permet d'éviter au moins 35% de traitements inutiles.

D'autres outils de diagnostic, comme Wheatpest ou Quantipest (voir aussi paragraphe 2.2), sont en cours d'étude dans le cadre d'un partenariat élargi à l'Europe (programme Endure).

### **1.2.2 Des méthodes de lutte biologique**

L'INRA a mis au point un procédé de lutte biologique contre la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*, via des lâchers de trichogrammes et/ou de *Macrocentrus cingulum*. Celui-ci est décrit au paragraphe 3.1).

D'autres tentatives ont été faites dans le passé par l'INRA mais rapidement abandonnées car n'ayant pas donné de résultats probants ou bien impossibles à développer à grande échelle ; c'est le cas par exemple de l'emploi de champignons pathogènes de pucerons des céréales, de l'ordre des Entomophthorales, et également de la lutte biologique contre l'agent du piétin échaudage par enrobage des semences avec une souche hypo-agressive du parasite, testés tous les deux à l'INRA dans les années 80.

---

<sup>3</sup> En partenariat avec Bayer Crop Science France. Colibri® est diffusé depuis 1999, et Aphi-net® depuis 2004 par cette firme agropharmaceutique.

### 1.2.3 L'approche génétique

Une autre voie consistant à mettre au point des cultivars de blé nécessitant moins de pesticides peut se faire par la recherche et l'exploitation de résistances dans la diversité génétique intra et inter-spécifique.

Ainsi, l'INRA a introgressé<sup>4</sup> (années 60-70) la résistance au piétin-verse à partir de l'espèce sauvage *Aegilops ventricosa*. Ces dernières années, des lignées de blé dur résistantes au puceron des épis *Sitobion avenae* ont été obtenues en incorporant une partie du génome d'une lignée de *Triticum monococcum*. L'INRA a également introgressé la résistance au virus de la JNO (Jaunisse nanisante de l'orge) issue de chiendents (genres *Thinopyrum* et *Lophopyrum*) dans des lignées de blé tendre. Ces deux types de lignées sont progressivement transférés à la sélection privée. A signaler également la sélection de la lignée (RE 607) résistante et tolérante au nématode à kystes des céréales *Heterodera avenae*.

Actuellement, on recherche des résistances via l'association de gènes et QTL<sup>5</sup> de résistance dans un même génotype. Pour des maladies comme les rouilles jaune et brune et la septoriose, l'analyse génétique de la résistance de variétés de blé qui ont été très cultivées pendant longtemps et sont restées peu sensibles à une maladie pendant cette période doit révéler des marqueurs moléculaires qui permettront la construction de génotypes portant les facteurs de résistance durable. La durabilité peut être recherchée par l'utilisation de combinaisons de gènes s'exprimant successivement à différents stades de la plante, limitant l'adaptation de l'agent pathogène.

L'INRA contribue par ailleurs à la mise au point de stratégies de gestion durable des résistances via des pratiques d'associations variétales valorisant une diversification des gènes et des mécanismes de résistance ou encore d'agencement spatial de systèmes de culture pour limiter la propagation des maladies et accroître la durabilité des résistances variétales (voir aussi paragraphe 2.6).

### 1.3 La lutte contre les adventices : vers une réduction de l'usage des herbicides

La lutte contre les adventices ou mauvaises herbes peut être facilitée par une meilleure compétitivité des variétés de blé tendre vis-à-vis des adventices. Lancée en 2007 (projet FSOV), l'étude de différents idéotypes de blé pour leur aptitude à la compétition vis-à-vis des adventices dans différents milieux est conduite en essais analytiques en stations INRA et Arvalis institut du végétal, et dans les conditions de l'agriculture biologique dans le réseau ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique). L'idée est de combiner variétés compétitives, rotations nettoyantes, semis plus tardifs et désherbage mécanique pour réduire le recours aux herbicides.

### 1.4 Economiser l'eau

En ce qui concerne la valorisation de l'eau, deux types d'approches sont conduits conjointement à l'INRA : la détection de génotypes tolérants au déficit hydrique et la recherche de mécanismes « d'évitement » du risque climatique.

---

<sup>4</sup> Introgression : Au plan phénotypique, transfert d'un caractère d'une espèce à une autre espèce - au plan génétique ou génomique : insertion d'une information génétique, d'une séquence nucléotidique (fragment de chromosome) d'une espèce donnée dans une autre espèce par le biais d'un croisement spontané ou d'une hybridation contrôlée dans un but d'amélioration

<sup>5</sup> QTL : Quantitative Trait Locus : région du génome impliquée dans la variabilité de l'expression d'un caractère quantitatif

#### **1.4.1 La détection/sélection de génotypes tolérants au déficit hydrique**

L'INRA travaille à la mise au point d'outils de sélection de génotypes de blé plus tolérants à la sécheresse et/ou aux fortes températures et à la recherche de variétés de maïs tolérantes au déficit hydrique. En particulier pour le maïs, on se propose de mettre au point des variétés tolérantes à certains scénarios de sécheresse possibles en se référant aux climats les plus fréquents en France, secs mais non arides. Il s'agit d'exploiter la variabilité naturelle de réponse au déficit hydrique pour intégrer des allèles favorables dans du matériel cultivé européen. Pour ce faire, des QTL de réponse sont analysés, en utilisant un modèle écophysologique permettant de caractériser séparément et de façon répétable les réponses de la croissance végétative à la température, et aux déficits hydriques de l'air et du sol.

#### **1.4.2 L'évitement du risque climatique par l'adaptation du rythme de développement de la plante**

La phénologie, c'est-à-dire la durée des différentes phases du cycle de la plante, est un facteur essentiel de l'adaptation à l'environnement. Une meilleure maîtrise du rythme de développement de la plante peut en effet favoriser l'échappement à des stress biotiques et abiotiques ; celle-ci est donc susceptible d'éviter que la culture ne rencontre des facteurs environnementaux défavorables et permet des rendements accrus et/ou une consommation d'intrants optimisée.

La maîtrise de la caractérisation phénotypique et l'accès à des gènes candidats du rythme de développement et de la précocité chez le blé et le maïs pourront accélérer la création de variétés présentant une adaptabilité améliorée à différents climats et conditions d'environnement locales. Ainsi pour le maïs, on propose une stratégie d'économie de l'eau et de meilleure valorisation des ressources de l'environnement par sélection de variétés adaptées à des semis plus précoces et présentant une floraison optimisée en fonction des environnements visés et une maturation du grain accélérée. Des travaux sont en cours à l'INRA pour la description phénotypique et la caractérisation génotypique de ressources génétiques et de lignées élites par des marqueurs allèle-spécifiques (SNP) dérivés de gènes du développement floral et de la précocité (besoins en températures, sensibilité à la photopériode).

### *1.5 Sélection variétale et conduite « bas intrants »*

L'INRA, à travers le groupe céréales à paille du département Génétique et Amélioration des Plantes conduit depuis de très nombreuses années des travaux d'amont sur l'exploration et l'exploitation de la diversité génétique intra et inter-spécifique. Aujourd'hui encore, l'évaluation des collections de ressources génétiques de blé pour la résistance aux maladies et la valorisation des conduites bas intrants contribue à identifier de nouveaux gènes exploitables en sélection. La méthodologie de la sélection et l'intégration de nouveaux outils comme les marqueurs à haut débit pour la sélection génomique du blé demeurent un sujet de recherche majeur et débouchent sur des travaux plus en aval sur la sélection des céréales à paille, du blé tendre en particulier. Ainsi, la sélection de variétés de blé rustiques vise à l'optimisation de l'exploitation de la diversité génétique par la sélection de génotypes multi-résistants aux maladies. A cet objectif prioritaire se sont ajoutés la problématique de la valorisation de ressources limitantes en azote (depuis la fin des années 90), et plus récemment le thème de la compétition avec les adventices pour une alternative partielle aux herbicides.

Pour ce qui concerne les pratiques culturales à bas intrants, depuis 2000, le groupe « création variétale blé tendre » expérimente, en faibles intrants et en agriculture biologique et sur quatre sites INRA, des lignées rustiques de blé tendre sélectionnées pour les conduites économes (voir paragraphe 3.3).

Dans les années 60-70, l'INRA a directement contribué à la création d'une nouvelle espèce, le Triticale qui permet une meilleure valorisation de zones marginales du territoire et/ou l'utilisation de moins intrants pour une consommation des grains directement sur le lieu de production. Aujourd'hui, la

création de populations à base génétique large vise à l'augmentation de la diversité génétique du Triticale (voir paragraphe 3.2.3).

## 2. Reconception et évaluation des systèmes de production

L'augmentation de l'efficacité des intrants est un levier puissant pour accroître la durabilité des systèmes de culture. Cependant, la simple juxtaposition de l'amélioration de chacune des techniques mises en œuvre par l'agriculteur ne suffit pas à construire une conduite améliorée. Les effets des techniques sont en effet en interaction au sein du champ cultivé, et l'agriculteur doit les assembler de façon cohérente pour satisfaire l'ensemble de ses propres objectifs et contraintes. Par exemple, la fertilisation minérale ne peut être raisonnée indépendamment du niveau de croissance du peuplement, qui dépend lui-même de décisions prises au semis, et devra répondre à des exigences de qualité de la récolte et à des contraintes réglementaires.

Un deuxième ensemble de travaux conduits par l'INRA avec ses partenaires pour accroître la durabilité de l'agriculture a donc été mené au niveau de la conduite globale du système de culture. Il s'agit ici de proposer des itinéraires techniques (échelle annuelle) et des successions de cultures (échelle pluri annuelle) innovants, et de bâtir des méthodes d'évaluation de ces systèmes permettant de guider leur amélioration, voire de les adapter ou coordonner à l'échelle du territoire.

### 2.1 Des itinéraires techniques alternatifs

La conception d'itinéraires techniques à niveaux d'intrants réduits a été menée sur le blé tendre. On propose une alternative au modèle économique dans lequel la maximisation du profit est obtenue en visant les niveaux de rendement les plus élevés possibles, ce qui conduit à mettre en œuvre une forte quantité d'intrants (engrais minéraux, pesticides). Dans une nouvelle logique, on accepte de réduire modérément l'objectif de rendement, et on maintient la marge économique en diminuant conjointement la consommation d'intrants donc les coûts de production. Les résultats économiques sont satisfaisants avec un avantage au système extensif qui s'accroît pour des niveaux plus faibles de prix de vente du blé.

Dans le Sud de la France, dans un contexte de recours fréquent à l'irrigation, on a recherché des stratégies culturales de gestion de l'eau définissant des modes de conduite alternatifs, en introduisant dans la rotation des espèces moins sensibles à la sécheresse, en décalant les périodes de forts besoins en eau pour esquiver les séquences sèches, ou en limitant la consommation en eau des cultures par la réduction de l'indice de surface foliaire pour mieux permettre la satisfaction des besoins durant tout le cycle.

### 2.2 Des outils pour piloter et prendre des décisions

Pour conduire le blé avec une fertilisation réduite, on a mis au point des méthodes incluant des outils de pilotage comme la méthode Jubil qui inclut l'utilisation de la teneur en nitrates de la base de la tige (voir paragraphe 2-1) pour n'apporter une fertilisation de complément que lorsque cet indicateur révèle qu'elle est véritablement nécessaire.

D'autres méthodes ont été proposées, certaines simples à mettre en œuvre au champ (bande double densité...), d'autres à base de modèles destinés à évaluer par simulation plusieurs stratégies de fertilisation. Le modèle Azodyn intègre ainsi l'effet de carences temporaires en azote sur le rendement du blé. Une version destinée à l'agriculture biologique, Azodynorg prend en compte tant les spécificités de la fertilisation organique que la présence fréquente d'adventices dans les parcelles en agriculture

biologique. Le modèle Volt'Air prend pour sa part en charge la prédiction des pertes au champ par voie gazeuse, d'ammoniac dans un premier temps puis de pesticides.

La mesure de la réflectance du couvert fournit également une indication globale sensible à l'état d'alimentation hydrique et minérale et à l'incidence des maladies.

Anticiper l'appréciation de la pression des bioagresseurs et de leur incidence sur le rendement est également nécessaire pour optimiser le recours aux pesticides. La plate-forme QuantiPest propose ainsi aux chercheurs, formateurs et conseillers des standards de définition des pressions biotiques visant à uniformiser la caractérisation des situations culturales. Le modèle Wheatpest intègre l'ensemble des pressions biotiques liées à plusieurs maladies, ravageurs, et mauvaises herbes pour prédire globalement la perte de rendement du blé liée à ces communautés complexes.

### *2.3 Valoriser la rusticité des variétés*

La mise au point d'itinéraires techniques mobilisant des quantités réduites d'intrants, ou conformes au cahier des charges de l'agriculture biologique, nécessite également de valoriser les différences de sensibilités variétales aux niveaux de divers stress. Une démarche associant des variétés rustiques de blé tendre et des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants permet par exemple de valoriser les résistances variétales aux maladies dans des conduites utilisant une protection fongicide et une fertilisation azotée réduite. Cette moindre utilisation de fongicides accroît d'ailleurs la durabilité de ces résistances variétales. De telles conduites montrent des bilans économiques satisfaisants et moins sensibles aux conjonctures de prix des produits agricoles et des intrants, avec conjointement une réduction des impacts environnementaux liés aux pesticides et à la fertilisation azotée, et une amélioration des performances énergétiques de la culture (voir paragraphe 3.3).

La valorisation de variétés rustiques justifie une démarche comparative entreprise par le groupe céréales à paille du département Génétique et Amélioration des Plantes pour déterminer le ou les itinéraires techniques (azote, très faibles intrants, agriculture biologique...) les plus efficaces en sélection.

### *2.4 Raisonner les successions*

L'amélioration des itinéraires techniques pour la conduite d'une culture ne peut être dissociée du raisonnement des successions de cultures et de la gestion des périodes d'interculture. Le test de différentes méthodes de lutte contre les adventices intégrant lutte chimique, lutte mécanique et gestion de la succession de cultures a été conduit dans un essai de longue durée et a permis de construire des systèmes utilisant peu d'herbicides tout en assurant une maîtrise à long terme de la flore adventice. Utiliser la succession de cultures comme levier dans la lutte contre les mauvaises herbes impose une diversification des espèces cultivées, en particulier avec l'introduction de cultures de printemps à plus faible productivité, qui pénalise les résultats économiques.

Dans le cas d'une interculture longue, une limitation de la pollution des eaux souterraines liée à la lixiviation des nitrates est rendue possible par l'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN). Les CIPAN permettent d'immobiliser sous forme organique les reliquats d'azote minéral laissés par le précédent ou issus de la minéralisation automnale ; après destruction de la CIPAN, ce stock d'azote est remis à la disposition de la culture suivante. L'introduction de légumineuses dans la succession renouvelle aussi la question de la gestion pluriannuelle de l'azote et constitue un levier puissant pour limiter la consommation d'engrais azoté et améliorer le bilan énergétique de l'agriculture.

L'allongement des successions et la diversification des cultures sont également un des moyens mobilisés dans la recherche de systèmes de culture sans pesticides testés en expérimentation de

longue durée. Des réseaux de conseillers et d'agriculteurs sont associés aux travaux de l'INRA pour concevoir et tester des systèmes de culture innovants moins dépendants des pesticides et permettant d'améliorer les performances énergétiques.

### *2.5 La dimension spatiale : répartir les systèmes de culture dans le territoire*

La mise au point d'alternative à la lutte chimique contre les maladies des cultures passe également par le raisonnement de l'agencement spatial des systèmes de culture afin de limiter la propagation des maladies et ravageurs et de prolonger la durée des résistances variétales. Les travaux en cours intègre à la fois la position relative des cultures hôtes ou non hôtes, les types de résistance des variétés utilisées et les itinéraires techniques pratiqués, mais également la présence et la localisation des espaces non agricoles (bois, bordures de parcelles ou de voies de circulation) qui vont conditionner la dynamique de l'inoculum.

Des travaux relatifs à l'aménagement des zones de bas de pente et de bordure de rivières pour limiter le ruissellement et détoxifier des produits phytosanitaires sont par ailleurs à l'origine de la pratique devenue réglementaire de bandes enherbées pour réduire la pollution des eaux de surfaces par les éléments entraînés dans le ruissellement (pesticides, azote, phosphore).

L'estimation du risque de ruissellement lié au système de culture pratiqué en amont peut être faite à partir du modèle DIAR qui relie l'évolution des états de surface du sol aux techniques culturales et au scénario climatique. L'intégration spatiale à l'échelle d'un bassin versant permet d'estimer le risque d'érosion et de proposer des techniques de conservation des sols.

La question de la gestion des ressources naturelles à l'échelle d'un territoire peut être facilitée par l'usage d'outils de modélisation des connaissances de différents acteurs, organisant la concertation et permettant l'émergence de consensus pour des décisions collectives. Dans le Sud, c'est aussi à cette échelle que la ressource en eau d'irrigation est gérée, sur la base d'une modélisation prévisionnelle dynamique et spatialisée des besoins permettant de piloter le réapprovisionnement des cours d'eau (ADEAUPI). De tels outils, co-construits avec le gestionnaire de l'eau, résultent du couplage d'un modèle biophysique et d'un modèle décisionnel (Moderato), associé à des bases locales de données de climat, de sol et de systèmes de production.

A cette échelle encore, le diagnostic d'un problème agri-environnemental (par exemple, la pratique du brûlage des pailles de riz) peut trouver sa solution dans une innovation technologique et économique (dans cet exemple, la création d'une filière de valorisation de la paille de riz).

### *2.6 Mélanger variétés et espèces*

L'utilisation de mélanges de variétés ou d'espèces se présente comme une alternative possible au modèle d'agriculture intensive reposant sur des systèmes de culture simples et un petit nombre de cultures pures conduites pour atteindre le rendement potentiel. Avec le mélange de variétés de blé tendre, on cherche à associer des plantes présentant des résistances différentes vis-à-vis des diverses maladies, afin de limiter la propagation de l'infection au sein du peuplement et d'augmenter la durée des résistances variétales. Cette technique s'est montrée efficace pour limiter les attaques de plusieurs maladies du blé, mais elle doit être accompagnée en aval par la filière. Cette hétérogénéité variétale pourrait améliorer aussi l'absorption des éléments minéraux via des phénomènes de facilitation semblables à ce qu'on peut observer dans les écosystèmes naturels à forte biodiversité.

L'intérêt d'un accroissement de la diversité spécifique intra peuplement est également étudié dans le cas d'associations entre céréales et légumineuses. L'objectif est de profiter des capacités de fixation symbiotique de la légumineuse pour assurer la nutrition azotée de la céréale avec des apports

minéraux réduits. La propagation des insectes et maladies dans ces mélanges d'espèces est également ralentie. Les travaux portent sur les règles de constitution du mélange de semences (proportion de chaque espèce) et sur le raisonnement de la fertilisation azotée.

Dans les systèmes de culture sous couvert végétaux (SCV), on abandonne le travail du sol à l'exception d'un travail localisé sur la ligne de semis, et on laisse le sol sous un couvert végétal constitué de résidus de culture ou d'une culture vivante (plante de service), conduite pour rendre des services écologiques tels que la maîtrise des populations adventices, la réduction du risque d'érosion... Ces systèmes de culture, développés à l'origine en régions chaudes, font l'objet de travaux d'évaluation de leurs performances agronomiques, économiques et environnementales. Leur progression en terme de surface cultivée est potentiellement importante vu la tendance actuelle à l'abandon du labour, si la compétition entre culture de rente et plante de service peut être maîtrisée.

Une autre voie d'augmentation de la biodiversité cultivée est fournie par l'agroforesterie, dans laquelle on associe arbres et cultures sur la même parcelle, en adoptant une disposition spatiale qui permet de conserver la mécanisation des travaux. Ces systèmes imposent une évaluation sur le long terme, indispensable pour estimer les gains liés à la production forestière, qui viennent compenser la baisse de rendement des cultures induite par la compétition entre espèces. L'analyse des relations écologiques au sein de ces systèmes explique des performances intéressantes sur le plan économique, et des impacts environnementaux favorables.

## 2.7 Faire une évaluation globale des systèmes de culture

La conception de nouveaux systèmes de culture nécessite d'évaluer et de comparer les performances de plusieurs systèmes. Cette comparaison doit être multicritère afin de prendre en compte les différents objectifs poursuivis tant par les agriculteurs que par la société, objectifs de production et de revenu, objectifs environnementaux, objectifs sociaux. Il faut pour cela disposer d'outils et de méthodes pour agréger des évaluations élémentaires portant sur des domaines variés.

L'indicateur Indigo® permet de calculer et d'agréger des indices d'impact des pratiques agricoles sur l'air, le sol, les eaux souterraines et de surface afin d'identifier les aspects à corriger en priorité. La méthode MASC propose d'évaluer *a priori* la durabilité des systèmes de grande culture à partir de leur caractéristiques, afin de rechercher, parmi un ensemble de systèmes possibles, lesquels sont les plus à même de fournir des résultats intéressants et doivent de ce fait être mis en expérimentation. La méthode propose un mode d'agrégation des différents critères élémentaires pour aboutir à une évaluation globale de la durabilité des systèmes (voir paragraphe 3.4).

## 3. Quatre exemples marquants

### 3.1 Lutte biologique contre la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*

La culture de maïs grain, maïs fourrage et maïs semence et de maïs doux fait l'objet d'attaques par plusieurs insectes ravageurs dont la pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera : Crambidae). Les attaques par les larves de cette espèce sont inégalement réparties en France et sont assez aléatoires d'une année sur l'autre. Les bassins les plus concernés sont le Sud-ouest, la région Ile de France et l'Alsace. Sur les 3 000 000 ha de maïs semés en France, environ 300 000 (10%) sont généralement traités aux insecticides (principalement contre la pyrale du maïs), et une autre partie subit les dommages de la pyrale à un niveau difficile à évaluer.

Ces traitements insecticides ont un impact négatif sur l'environnement et sur l'entomofaune auxiliaire. Prenant en compte ces impacts, des directives françaises et européennes sont en passe de limiter le

nombre d'insecticides homologués. Ce contexte offre un terrain propice à l'utilisation et à la recherche de nouveaux agents de lutte biologique.

Une souche de trichogramme, *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera : Trichogrammatidae), est commercialisée par la société Biotop (sous licence INRA), depuis plus de 20 ans. Les femelles de cet hyménoptère pondent leurs œufs dans ceux de la pyrale du maïs. De l'œuf parasité émergera, quelques jours plus tard, un trichogramme adulte libre. Ce mode de reproduction parasitaire conduit toujours à la mort de l'hôte, limitant ainsi le nombre de larves de pyrale infestant le maïs. Les trichogrammes sont utilisés sous forme de lâchers inondatifs saisonniers (225 000 à 600 000 insectes par ha) (Tabone et al, 2001). Les surfaces de maïs protégées par ce type de traitement augmentent régulièrement – les lâchers couvriraient actuellement 120 000 ha en France.

L'emploi des trichogrammes bute toutefois sur un problème de coût et de pratique de lâcher sur de grandes surfaces (lâchers manuels). L'efficacité des trichogrammes reste aussi limitée dans les cas de fortes infestations de pyrale. Un projet de recherche, associant notamment l'INRA en PACA et à Montpellier et la société Biotop, est actuellement en cours pour étudier la possibilité d'utiliser un second parasitoïde, *Macrocentrus cingulum* (Hymenoptera : Braconidae), dans la lutte biologique contre la pyrale du maïs. *M. cingulum* est un parasite des larves de pyrale. Son utilisation est envisagée en complément des trichogrammes pour limiter d'autant les dégâts des larves et les densités de population d'*O. nubilalis*, notamment en cas de multivoltinisme<sup>6</sup> du ravageur (Sked et Calvin, 2005).

### 3.2 Ressources génétiques, céréales à paille et maïs

Le principe est de rassembler, décrire, conserver la diversité génétique et ainsi la mettre à disposition des programmes de sélection et de création de nouveaux cultivars. Tous les systèmes de production sont concernés : agriculture intensive mais aussi agriculture à faibles intrants et AB. Il s'agit de conserver et d'utiliser les ressources génétiques afin de diversifier la base génétique des variétés cultivées. Les critères environnementaux sur lesquels ces travaux ont un impact positif sont principalement la réduction des intrants (azote, pesticides) et une meilleure valorisation de l'eau. Deux solutions sont proposées et mises en œuvre par l'INRA pour rassembler et conserver les ressources génétiques *ex situ* et *in situ*.

#### 3.2.1 Ressources génétiques conservées *ex situ*

##### Collecte, conservation

Le Centre de Ressources Génétiques (CRG) de l'INRA de Clermont-Ferrand conserve de façon *ex situ*, de vastes collections de ressources génétiques des principales espèces de céréales à paille actuellement cultivées en France (12 000 blés tendres, 2500 blés durs, 6500 orges, 1000 avoines, 1200 triticales et 70 seigles). Pour le maïs, les sites de Saint Martin de Hinx, Montpellier et de Guadeloupe (diversité tempérée et tropicale) entretiennent les ressources génétiques lignées et populations rassemblées au cours des décennies.

##### Description des ressources génétiques conservées *ex situ*

Ces ressources (populations de pays, lignées de sélection, variétés) sont susceptibles de contenir des gènes d'intérêts permettant de répondre aux problèmes actuels de la production agricole. Ces collections sont pour partie décrites pour des caractères agronomiques (précocité, hauteur, sensibilité à

---

<sup>6</sup> Plusieurs générations par an

la verse, sensibilité aux pathogènes,...), technologiques et moléculaire (SSRs, DArTs, SNPs<sup>7</sup>) (Balfourier et al, 2007). On s'attache à trouver des sources de variabilité ou encore à repérer les allèles originaux pour les caractères recherchés.

### Conservation, diffusion

Ces ressources sont multipliées, conservées selon un processus d'assurance qualité et distribuables sous forme d'échantillons, toute l'information étant gérée par ailleurs dans des bases de données informatisées (base de données SIREGAL : <http://urgi.versailles.inra.fr/siregal/siregal/welcome.do>).

Au plan international, les équipes « blé » et « maïs » ont versé des ressources au traité International sur les Ressources Phytogénétiques pour l'Alimentation et l'Agriculture de la FAO ([http://www1.montpellier.inra.fr/zea\\_french\\_network/](http://www1.montpellier.inra.fr/zea_french_network/) : collection nationale « maïs » échangeable et valorisable selon les règles du Traité International sur les Ressources Phytogénétiques pour l'Alimentation et l'Agriculture de la FAO ; des ressources en blé ont aussi été introduites dans ce système).

### Valorisation des ressources génétiques

La valorisation des ressources génétiques en création variétale est une opération longue. Des méthodes récentes accélèrent cette valorisation (Gouesnard et al, 2005) : étude de la structuration génétique, définition de core collections<sup>8</sup>, recherche de QTL, sélection assistée par marqueurs. Les recherches menées à l'INRA couvrent ces différents champs avec des développements intéressants sur la précocité de floraison, la valorisation de l'azote et la résistance aux stress.

La valorisation sous forme de cultivars nécessite le concours des sélectionneurs pour introgresser les gènes d'intérêt dans un fond génétique adapté. Les panels de lignées et populations sont accessibles aux sélectionneurs partenaires des actions.

### **3.2.2 La conservation in situ des ressources génétiques, gestion dynamique de populations**

La gestion dynamique (GD) est une solution alternative qui vise à conserver la diversité au sein d'un ensemble de populations génétiquement hétérogènes distribuées dans des environnements contrastés et soumises aux pressions évolutives (sélection, mutation, dérive génétique, migration). Un programme expérimental de GD de populations de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) a démarré à l'INRA en 1984. Il a été montré que la GD avait permis la différenciation des populations (résistances aux maladies, précocité de floraison,...) par adaptation locale en réponse à des pressions de sélection naturelle, tout en préservant la variabilité génétique globale. La culture de populations diversifiées semble également favoriser certains éléments de la biodiversité sauvage associée. Les premiers résultats d'analyse de diversité sur ces populations semblent montrer que la diversité ainsi gérée à la ferme est complémentaire de celle conservée en banques de graines.

En France, ces travaux sont conduits en partenariat avec un réseau d'agriculteurs qui, dans une démarche d'application des principes de l'Agriculture Biologique (AB) s'implique depuis quelques années dans la gestion de la diversité à la ferme. Au plan international, le programme de GD a été considéré comme un "modèle" par la FAO<sup>9</sup> et l'IPGRI<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup>SSRs Simple-Sequence Repeat ou microsatellites, DArT Diversity Arrays Technology, SNPs Single Nucleotide Polymorphisms sont des technologies de marquage ou génotypage qui permettent de constituer des cartes génétiques et de développer des marqueurs de régions spécifiques du génome des plantes.

<sup>8</sup> Core collection ou collection "noyau": petite collection de travail constituée à partir d'une grande collection de ressources génétiques. La core collection doit représenter la diversité et la structure de la variabilité génétique de la grande collection dont elle est issue.

<sup>9</sup>Food and Agriculture Organization of the United Nations

<sup>10</sup>Institut international des ressources phytogénétiques

Par ailleurs, les programmes de recherche concernant la gestion dynamique font l'objet de collaborations actives avec la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (France) - UMR 5173 Conservation des espèces, Restauration et suivi des populations, le Muséum National d'Histoire Naturelle (France), l'université de Kassel (Allemagne) - Department of Ecological Plant Protection, Organic Research Centre (Royaume-Uni) – Elm Farm Wakelyns Agroforestry, E. Lammerts van Bueren, Louis Bolkinstituut (LBI) (Pays-Bas), le RSP, Réseau Semences Paysannes (France).

### **3.2.3 Gestion et augmentation de la diversité génétique du Triticale**

Cette espèce créée par l'homme (la première variété de Triticale inscrite au catalogue officiel des variétés a été créée par l'INRA), permet d'allier des caractéristiques de rusticité du seigle à des qualités d'utilisation du blé tendre. Cela en fait une espèce prisée des agriculteurs-éleveurs des zones de demi-montagne ou de zones marginales, tant pour le grain que pour la paille (forte biomasse, qualité pour l'alimentation). D'autre part, dans des zones plus favorisées, c'est une culture relativement économe en intrants (azote bien valorisé et bonnes résistances aux maladies en général). C'est une espèce qui, en elle-même, élargit la gamme d'espèces agricoles disponibles pour les agriculteurs en vue de valoriser des situations particulières. Cependant, la diversité génétique de cette espèce, nécessairement limitée par son origine artificielle, implique un travail continu d'enrichissement à partir des espèces progénitrices blé et seigle. C'est l'objet du travail mené à partir de croisements inter-génériques blé x seigle soit par schéma de sélection classique ou soit par gestion dynamique de populations de pré-breeding.

Depuis 1996, plusieurs programmes de diversification du triticale se font en partenariat avec les sélectionneurs français de triticale regroupés au sein du GIE TRITICALE : AgriObtentions, Florimond-Desprez, Lemaire-Deffontaines, R2n et Serasem.

### ***3.3 Blés rustiques***

Les travaux du réseau d'essais agronomiques « itinéraires techniques pour variétés rustiques de blé tendre », communément appelé «ITK blés rustiques » ont démarré en 1999 à l'initiative de l'INRA, des sélectionneurs du GIE Club5<sup>11</sup> et d'Arvalis Institut du végétal. Dans un contexte de prix bas du blé et d'impacts environnementaux de moins en moins bien acceptés, ils ont en trois campagnes démontré l'intérêt économique et environnemental d'associer variétés récentes multirésistantes aux maladies et à la verse et productives (dites « variétés rustiques ») à des itinéraires techniques en protection intégrée des cultures, économes en intrants chimiques. La protection intégrée, basée sur une approche globale de la culture en remplaçant au maximum des intrants par des processus naturels de contrôle ou de régulation, cherche à minimiser l'utilisation d'intrants en jouant sur le système de production lui-même, pour réduire, notamment, les risques parasitaires. La réussite de ce couple passe par la cohérence de l'itinéraire technique : semis en densité réduite à une date normale (pas de semis précoce), choix d'une variété rustique, impasse sur l'apport d'azote au tallage, inutile et polluant, suppression du régulateur de croissance, protection par un traitement fongicide unique (car moins de biomasse précoce et variété multirésistante aux maladies et à la verse), enfin apport d'azote tardif assurant la qualité marchande de la récolte. Les premiers résultats 2000-2002 du contrat de branche ont convaincu les Chambres d'Agriculture de l'intérêt d'une extension du réseau, avec poursuite de l'implication de l'INRA et d'Arvalis Institut du Végétal. Entre 2003 et 2010, ce nouveau réseau, bien qu'informel, a réalisé plus de 200 essais sur un grand tiers nord-ouest de la France. Le dispositif comporte des essais variétés x itinéraires (tableau ci-dessous), mais aussi screening variétal en conduite intégrée et bas intrants,

<sup>11</sup> C.C. Benoist, F. Desprez, Serasem et Verneuil

optimisation de l'azote et des fongicides en conduite intégrée. Depuis 2005, le réseau s'est ouvert à une autre céréale à paille, l'orge.

Les résultats 2004-2007 comparant sur quatre campagnes variété rustique en conduite intégrée et variété à haut rendement en conduite intensive raisonnée (objectif de rendement élevé, respect des seuils d'intervention, N tallage) montrent que si l'on réduit de 30% en valeur les intrants, alors les rendements baissent de 6 à 11% et l'indicateur de fréquence des traitements (IFT<sup>12</sup>) est réduit de 35% (Bouchard et al, 2008). Dans un contexte de prix bas du blé, c'est à dire 8 des 10 années de la décennie 2001-2010, la meilleure marge brute est obtenue par le couple variété rustique x itinéraire intégré, le moindre rendement étant plus que compensé par la réduction des charges opérationnelles. En période de cours élevé des céréales, l'avantage est à l'itinéraire raisonné avec la variété à haut rendement, mais dans ce cas les deux couples réalisent des marges brutes élevées (Meynard et al, 2010). Le prix moyen de basculement pour l'obtention de la meilleure marge brute entre les deux itinéraires est proche de 150 €/tonne.

		Nombre d'essais	Rendement (q/ha)	Variabilité rendement (écart-type)	Marge (€/ha)		IFT moyen (tous produits)	Réduction IFT	Réduction rendement (%)
					à 100 €/t	à 180 €/t			
2004	Rais.-Orvantis	12	90,4	17,4	466	1190	4	1,3	11%
	Inté. - Caphorn		80,7	16,4	489	1135	2,7		
2005	Rais.-Orvantis	30	85,3	12,6	477	1159	3,6	1,3	7%
	Inté. - Caphorn		79	10,7	530	1162	2,3		
2006	Rais.-Orvantis	26	85,4	14	501	1184	3,1	1,2	6%
	Inté. - Caphorn		79,9	12,7	556	1195	1,9		
2007	Rais.-Orvantis	32	77,9	9,6	390	1013	4,2	1,6	9%
	Inté. - Caphorn		71,2	10,9	425	995	2,6		
moyenne	Rais.-Orvantis	100	84,8		459	1137	3,7	1,4	9%
	Inté. - Caphorn		77,7		500	1122	2,4		

Rais. : conduite raisonnée

Inté. : conduite intégrée

**Tableau 1 :** Réseau « ITK blés rustiques » : comparaison des performances (Guichard et al, 2010) des modes de conduite "raisonné" (niveau 1) et "intégré" (niveau 2) entre 2004 et 2007 pour 2 variétés et 2 niveaux de prix (€/t)

### 3.4 Les outils MASC et INDIGO

Indigo® et MASC ont été choisis pour illustrer la catégorie des outils et méthodes génériques d'évaluation de systèmes de culture, développés pour accompagner l'évolution des systèmes de culture pratiqués ou la co-conception de systèmes de culture innovants.

Indigo® et MASC sont de plus en plus largement utilisés par les conseillers du développement et les chercheurs dans leur travail avec les agriculteurs ou les groupes. Ces 2 outils sont mis à disposition via une licence gratuite<sup>13</sup> pour tout travail de recherche et développement ou dans le cadre de la formation. L'efficacité de ces deux outils est actuellement renforcée par le développement de leur usage coordonné, en particulier dans le cadre des réseaux mixtes technologiques (RMT) DevAB (développement de l'agriculture biologique) et SdCi (systèmes de culture innovants).

Les deux outils prennent en compte la diversité des contextes et la dimension "multicritère" de l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture, et proposent à cette évaluation un cadre pratique, explicite et opérationnel, favorable à l'émergence de consensus entre points de vue *a priori* contradictoires.

<sup>12</sup>IFT = Somme des « IFT produit » avec : IFT Produit = dose appliquée par ha / dose homologuée par ha

<sup>13</sup>Pour des travaux de prestation de services, la licence d'Indigo® est payante.

### 3.4.1 Indigo®, une méthode d'évaluation des impacts environnementaux

Indigo® est une méthode d'évaluation de l'impact environnemental des systèmes de culture opérationnelle et facile à interpréter (Bockstaller et Girardin, 2006).

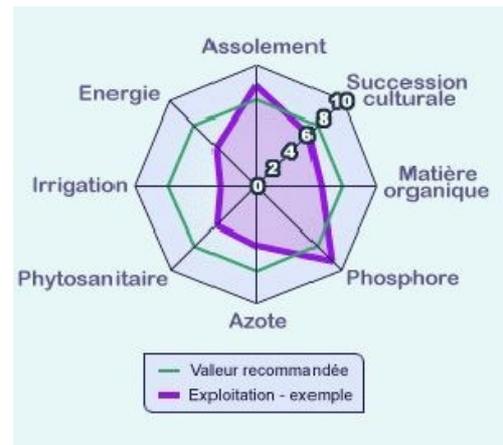
A partir d'une description simple du milieu et des pratiques culturales spécifiant le système de culture analysé, Indigo® calcule 2 groupes d'indicateurs :

- le risque potentiel de pollution que ce système de culture fait peser sur l'air, le sol, l'eau de surface et l'eau souterraine,
- la part prise dans ce risque par chaque groupe de pratiques agricoles : l'utilisation de l'azote, du phosphore, des produits phytosanitaires, de l'eau, de la matière organique, des ressources énergétiques non renouvelables, et la gestion de la rotation des cultures et de l'assolement.

Pour chaque indicateur, le logiciel calcule une valeur comprise entre 0 et 10 : en dessous de 7, le système de culture ou le pool de pratiques méritent d'être améliorés ; au-dessus, le risque est jugé acceptable. Il donne aussi le détail des résultats intermédiaires (ex : résultats par substance active) pour une analyse plus fine de la note finale.

L'utilisateur repère ainsi les points forts et les points faibles des pratiques analysées et identifie des causes possibles. Il peut alors déterminer d'une part quels sont les impacts environnementaux à corriger en priorité et d'autre part sur quelles pratiques il convient de faire porter d'abord son effort. Par une utilisation itérative, il peut également juger de l'intérêt de l'introduction de pratiques nouvelles. Indigo® donne les éléments pour bâtir un conseil agronomique personnalisé.

Les modules calculant les indicateurs associent connaissances agronomiques sur les processus et expertises régionales sur la sensibilité des milieux et systèmes de production. Mis au point par l'INRA de Colmar et de Nancy en collaboration avec l'Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), Indigo® poursuit l'élargissement de son domaine de validité à l'ensemble des régions et des systèmes de production français. On recense à ce jour environ 220 utilisations en France, INRA, Chambres d'Agriculture, Instituts techniques, organismes de développement et de formation... Indigo® est actuellement en particulier utilisé pour qualifier les critères élémentaires d'impact environnemental utilisés en entrée de la méthode MASC.



Plus d'informations sur Indigo® seront bientôt disponibles sur le site du projet Plage : <http://www.agro-transfert-rt.org/index.php/fr/nos-projets/centre-de-competences-et-de-ressource/-plage>, et son informatisation va être revue avec développement d'un calculateur sur site internet.

### 3.4.2 MASC, un outil pour évaluer a priori la durabilité de systèmes de culture.

Pour évaluer la durabilité d'un système de culture, il faut pouvoir construire une appréciation intégrée de ses performances économiques, sociales et environnementales. La difficulté rencontrée dans une telle évaluation "multicritère" est de trouver un consensus entre ces différents points de vue, parfois très contradictoires, et qui semblent souvent a priori inconciliables.

L'outil MASC<sup>14</sup> (pour *Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems*) est un modèle permettant d'évaluer la contribution au développement durable d'un système de culture, à partir de 32 critères élémentaires organisés en 3 catégories : économique, sociale, environnementale (Sadok et al, 2009). Indigo® peut être utilisé pour qualifier les 22 critères environnementaux. Pour évaluer un système de culture, il faut qualifier chacun de ces critères. MASC permet ensuite l'agrégation progressive des critères selon un "arbre" (Figure 1) qui aboutit *in fine* à une évaluation de la durabilité globale.

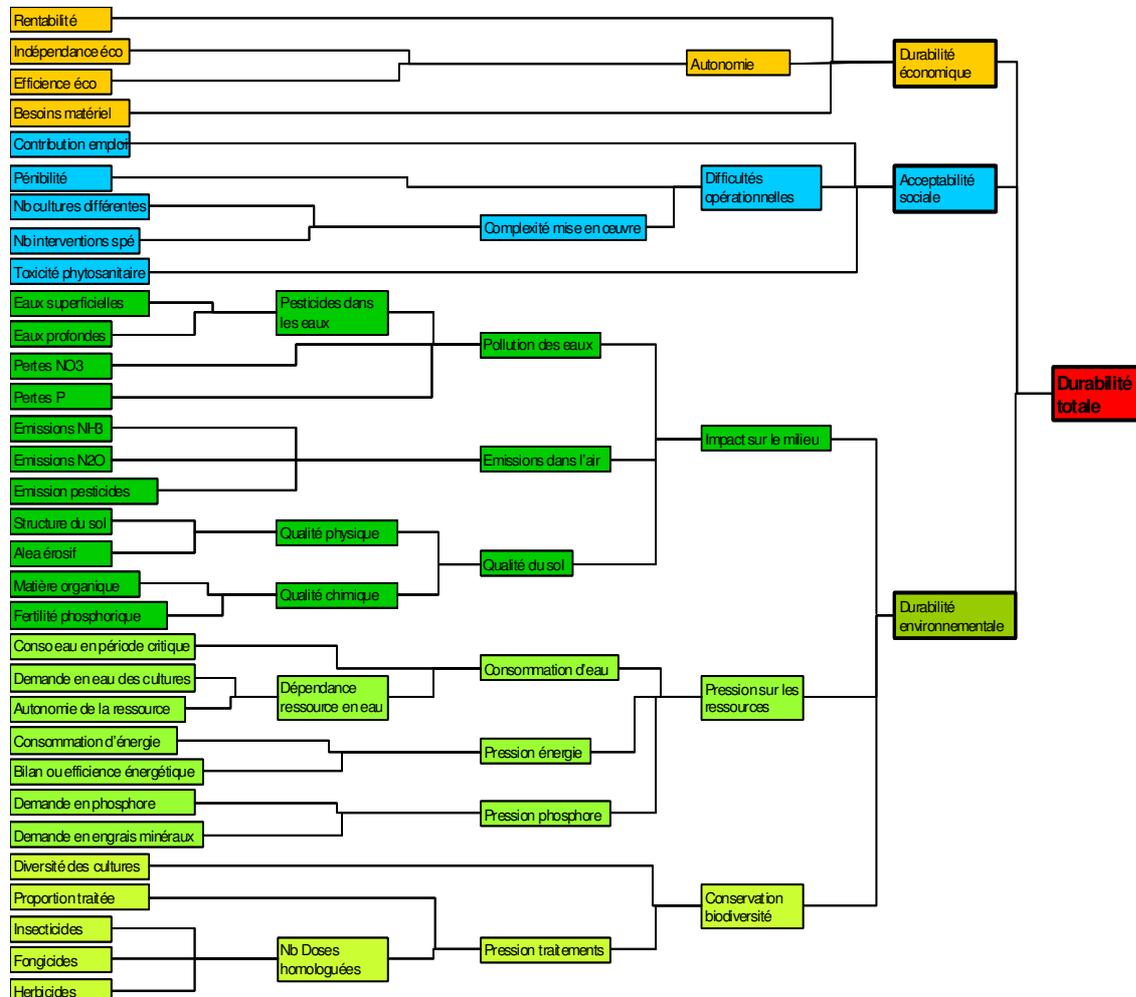


Figure 1 : Critères élémentaires de MASC et architecture de l'arbre

L'agrégation des critères se fait à l'aide de "règles d'agrégation" de type "si... et si..., alors..." qui déterminent le poids donné à chaque critère dans l'évaluation finale<sup>15</sup>. Ces règles d'agrégation et les classes définissant l'échelle de chaque critère sont proposées par des groupes d'experts et adaptables à chaque contexte. L'architecture de l'arbre est elle-même adaptable, pour détailler des groupes de critères jugés critiques ou en agréger plus rapidement d'autres moins problématiques.

MASC présente plusieurs intérêts. Il donne un contenu "technique" à la durabilité, selon ses trois dimensions. Ce contenu est susceptible d'évoluer selon les avancées scientifiques et les attentes

<sup>14</sup>Groupe de conception : F. Angevin, J.-E. Bergez, C. Bockstaller, B. Colomb, T. Doré, L. Guichard, A. Messéan, R. Reau, W. Sadok (INRA)

<sup>15</sup>Voir aussi : <http://agronomie.free.fr/colloque/Masc.pdf>

sociétales globales ou locales. Tout en permettant une certaine souplesse dans l'appréhension de la durabilité par ses utilisateurs (pour tenir compte en particulier du poids d'enjeux locaux), il les oblige à préciser leur vision de la durabilité. Enfin, il est simple d'usage, et pédagogique, puisque l'ensemble du fonctionnement est transparent. Ces caractéristiques en font un outil adapté aux actions de recherche-développement-formation visant l'exploration collective de pistes d'amélioration des pratiques agricoles et l'émergence de consensus. Il est ainsi utilisé dans le cadre du RMT Systèmes de culture Innovants pour évaluer *ex ante* les systèmes de culture innovants proposés, et dans celui du RMT DevAB (Développement de l'agriculture biologique) pour adapter avec un groupe de techniciens de la région Midi-Pyrénées l'arbre d'agrégation aux spécificités de l'agriculture biologique. La version 1.0 a été déposée à l'APP (Agence pour la Protection des Programmes) en janvier 2008. La version 2.0, attendue pour fin 2011, tient compte des retours d'expérience de la première vague d'utilisation dans différents contextes. Sa généralité sera améliorée par une meilleure prise en compte d'indicateurs agronomiques et d'insérabilité du système de culture dans les filières.

#### **4. Limites et perspectives de cette première synthèse de voies d'amélioration des impacts environnementaux de la production céréalière**

##### *4.1 Une approche par domaine de la production...*

Ce recensement de voies d'amélioration des impacts environnementaux de l'agriculture a été réalisé suite à une demande de la Direction Générale de l'INRA qui, fréquemment sollicitée sur ce thème, souhaitait faire un premier bilan des résultats des recherches menées à l'INRA en la matière. Cette investigation a été confiée aux "Groupes Filières" qui abordent les divers secteurs de la production depuis l'amont jusqu'au consommateur final. Compte tenu du cadre de ce travail et de son mode de réalisation, l'inventaire ne couvre pas toutes les dimensions qu'aurait une synthèse générale prospective sur cette question, il représente seulement un premier bilan. Cela explique une grande partie des limites mentionnées ci-après.

En premier lieu, cet inventaire de voies d'amélioration des impacts environnementaux de l'agriculture a été établi par domaine de la production. Même s'il comporte des approches intégrées pour toute une production et pour des systèmes de cultures, certains aspects ont été peu abordés car ils relevaient d'approches transversales. C'est le cas de tout ce qui concerne les sols, la biodiversité, les paysages, la localisation des productions, autrement dit tout ce qui est géré de façon plus globale, et peu à l'échelle d'une culture. De même, ont été peu explorés les travaux sur les liens entre filières végétales et animales, ou plus généralement les approches interdisciplinaires concernant les filières et les territoires, alors que les impacts environnementaux sont aussi et surtout à analyser et gérer à ces échelles. Une démarche systémique assez large est en effet nécessaire pour prendre en considération les interactions entre les diverses productions, les répercussions d'une diversification ou de l'introduction d'une nouvelle activité. De tels travaux existent à l'INRA et ailleurs, mais ne sont pas systématiquement recensés dans ce premier inventaire qui s'est surtout axé sur les aspects techniques. De façon plus large un changement de paradigme semble nécessaire dans la production agricole, mais cette première recension ne s'est pas focalisée sur les seuls travaux relevant de cette approche. La démarche adoptée est utile et pertinente dans un premier temps car les voies présentées sont relativement plus opérationnelles et un peu plus aisées à mettre en œuvre.

##### *4.2 ... ne répertorient pas pour l'instant les travaux sur les dimensions économiques et sociales de la durabilité...*

Ce premier inventaire n'a pas répertorié les travaux économiques et sociaux menés en la matière. Même si les investigations en agronomie ou en génétique n'ignorent pas les autres composantes de la

durabilité, il serait nécessaire d'intégrer ces recherches pour avoir une approche plus complète et plus holistique.

En premier lieu, les contraintes économiques pèsent fortement en agriculture, d'autant que le prix des produits agricoles livrés est souvent bas ou fluctuant et que les diverses charges pèsent lourdement : foncier, matériel, bâtiments, achats d'intrants et de services, endettement, charges fixes, etc. Cela est renforcé par l'importance de la compétition internationale, les centrales d'achats s'approvisionnant volontiers à l'extérieur si les prix y sont moindres. Il est nécessaire d'analyser de manière approfondie la compatibilité entre l'amélioration des impacts environnementaux et ces fortes contraintes.

Par ailleurs, l'adoption de pratiques écophiles (davantage en harmonie avec l'environnement) ne relève pas seulement du seul calcul de rentabilité à l'échelle de la production ou des exploitations, ou de l'adhésion individuelle des agriculteurs à ces orientations. Les freins et les leviers ne se situent pas seulement à cette échelle, mais aussi dans l'ensemble du système enserrant l'agriculture. En effet, ce système présente une cohérence d'ensemble qui rend difficile un changement en un point si le reste demeure inchangé. Ainsi, analysant les obstacles à une réduction de l'emploi des pesticides, Meynard (2010) note *"Il ne suffit pas de changer les objectifs assignés à l'agriculture pour que le système s'adapte automatiquement. A court terme, les seules voies de réduction de l'usage de pesticides qui peuvent être empruntées sont celles qui ne remettent pas en cause le système. A moyen terme, seule une évolution profonde du système socio-technique mobilisant simultanément tous les acteurs (ou au moins la majorité d'entre eux), pourra permettre d'atteindre des objectifs ambitieux. (...) Ainsi, pour expliquer qu'ils ne promeuvent pas les associations de variétés ou d'espèces, les coopératives invoquent les exigences de l'aval, les instituts techniques les difficultés logistiques des coopératives et les exigences des industriels. Chaque acteur organise sa stratégie en fonction de celle des autres, et considère qu'il peut difficilement en changer tant que celle des autres n'évolue pas »*.

Plus globalement, l'évaluation de l'impact de la mise en pratique d'innovations écophiles nécessite des approches multicritères des systèmes de production et des filières, en y intégrant les perspectives d'évolution des prix ainsi que la qualité des produits céréaliers en relation avec la santé et la sécurité alimentaire.

Enfin, l'adoption de pratiques respectueuses de l'environnement doit aussi satisfaire à des contraintes sociales et une autre difficulté tient à l'existence de points de vue très divers, voire divergents, sur les orientations à prendre pour les prochaines années et décennies. Les uns estiment que la priorité reste d'accroître la production agricole, y compris en France et en Europe occidentale, tandis que d'autres mettent la priorité sur la prise en compte de l'environnement et des ressources naturelles. Cette dernière option peut elle-même déboucher sur des choix différents, reposant pour certains sur l'innovation technique, pour d'autres sur des voies de développement alternatives (circuits courts, autonomie des agriculteurs et des exploitations...), voire sur la combinaison des deux. Ces divergences de vue en matière d'agriculture durable peuvent s'exprimer de manière frontale et faire obstacle à la recherche de solutions consensuelles. Les points de vue des divers acteurs de la filière gagneraient à être mieux analysés.

#### 4.3 ...des investigations à poursuivre

Cette première recension des innovations écophiles par production présente ainsi, de par son cadre de travail, des lacunes. Certaines font déjà l'objet d'investigations à l'INRA ou ailleurs, et pourraient être recensées en élargissant ce premier inventaire. D'autres nécessitent de nouveaux travaux de recherche. Parmi les divers aspects à inclure pour une approche interdisciplinaire plus holistique et plus large des questions en jeu, on peut noter ce qui concerne :

- **Les volets transversaux** intéressant quasiment toutes les productions : sols, état des sols, microbiologie, etc.; organisation spatiale des activités ; biodiversité et les paysages ; hydrologie; relations agriculture et changement climatique ; processus d'innovation et d'apprentissage...
- **La caractérisation des services écosystémiques** de ces pratiques, devant mobiliser des recherches en **agro-écologie** au sens large : tout ce qui relève d'une *"fertilisation croisée des disciplines écologiques, agronomiques et zootechniques (...) source de nouveaux concepts et d'innovations"* (INRA, 2010), ce qui correspond à un vaste programme de recherche.
- **Les aspects socio-économiques** à l'échelle des exploitations, mais aussi de la chaîne agroalimentaire et du développement territorial, pour intégrer les interactions entre activités et la question de la **localisation des productions**, de l'échelle locale ou régionale jusqu'à l'échelle mondiale...
- **La prise en considération de l'ensemble de la chaîne agro-alimentaire** afin de tenir compte de l'insertion étroite de l'agriculture dans celle-ci. Il est en effet nécessaire de ne pas dissocier la production agricole de son amont et de son aval : acheminements et transformations intermédiaires, commercialisations et transports finaux, voire utilisations par les acteurs en fin de chaîne et les consommateurs. De façon plus générale un questionnement sur les façons de produire en agriculture ne peut être dissocié d'une interrogation sur les modèles de consommation alimentaire.

## Conclusion

Bien que non exhaustif, cet inventaire des travaux de l'INRA en vue d'améliorer les impacts environnementaux de l'agriculture montre que les systèmes de production céréaliers ont représenté un élément important d'application de ces recherches. En effet, une soixantaine de voies d'amélioration ont été répertoriées dont près de la moitié sont dès à présent opérationnelles. L'analyse détaillée de ces travaux a aussi fait ressortir une évolution sensible des approches méthodologiques vers des questions plus complexes prenant en compte davantage de facteurs et de critères. La durabilité environnementale de la production ne suffit pas à elle seule ; elle n'a de sens que si on prend en compte toute la filière jusqu'aux consommateurs et si l'on y intègre les aspects économiques (y compris le contexte mondial), sociaux et territoriaux. Ce premier inventaire nécessite de fait d'être développé et certains axes de recherches doivent être amplifiés, notamment en matière d'agro-écologie (INRA, 2010). Par ailleurs ces nouvelles problématiques conduisent à une évolution du travail de recherche reposant sur un besoin accru d'interdisciplinarité, de démarche itérative et de co-construction avec les acteurs de terrain pour mieux s'adapter à divers contextes et développer de nouveaux processus d'innovation et d'apprentissage. En effet, les innovations ne sont pas des solutions livrées "clés en main" à appliquer à la lettre ; elles relèvent plutôt de démarches de conception et de construction collective et collaborative impliquant des travaux de groupes, des réseaux d'échanges sur le terrain et par internet. Dans cette vision, la mise en place de GIS (groupements d'intérêt scientifique), de RMT (réseaux mixtes technologiques) et d'UMT (unités mixtes technologiques) associant recherche publique, structures de développement agricole, organismes de formation et agriculteurs paraît constituer un moteur important d'évolution des pratiques.

## Références bibliographiques

Balfourier F., Roussel V., Strelchenko P., Exbrayat-Vinson F., Sourdille P., Boutet G., Koenig J., Ravel C., Mitrofanova O., Beckert M., Charmet G., 2007. A world wide bread wheat core collection arrayed in a 384-well plate. *Theor Appl Genet.* 114, 1265-1275

- Bockstaller C., Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : la méthode INDIGO. *Oléoscope* 85, 4-6
- Bouchard C., Bernicot M.-H., Félix I., Guérin O., Omon B., Loyce C., Rolland B., 2008. Associer des itinéraires techniques de niveau d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre : évaluation économique, environnementale et énergétique. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 55, 49-77
- Gouesnard B., Dallard J., Bertin P., Boyat A., Charcosset A., 2005. European maize landraces: genetic diversity, core collection definition and methodology of use. *Maydica* 50, 225-234.
- Guichard L., Munier-Jolain N., Omon B., P. Mischler P., Viaux P., Guindé L., Guérin O., Villard A., Delos M., Debaeke P., Brunet N., Rolland B., 2010. *Ecophyto R&D. Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires volet 1, Tome II : analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures.* 218 pages
- INRA, 2010. *Une science pour l'impact Inra 2010-2020 Document d'orientation.* Paris, INRA, 57 p.
- Meynard J.M., 2010. *Diffusion des pratiques alternatives à l'usage intensif des pesticides : analyse des jeux d'acteurs pour éclairer l'action publique.* Paris, Colloque Écophyto R&D: réduire l'usage des pesticides, 28/01/ 2010
- Meynard J.M., Rolland B., Loyce C., Félix I., Lonnet P., 2009. Quelles combinaisons variétés / conduites pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture de blé tendre ? *Innovations Agronomiques* (2009) 7, 29-47
- Sadok W., Angevin F., Bergez J.E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R., Messéan A., Doré T., 2009. MASC: a qualitative multi attribute decision model for *ex ante* assessment of the sustainability of cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 447-461.
- Sked S.L., Calvin D., 2005. Temporal synchrony between *Macrocentrus cingulum* (Hymenoptera : Braconidae) with its preferred host, *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Environmental Entomology*, 34 (2),344-352
- Tabone E.T., Lezcano N., Merceur V., 2001 : Lutte biologique à l'aide de trichogrammes. *PHM Revue Horticole* 424 Suppl: v-ix