



# Carrefours

de l'innovation  
agronomique  
2008

Maîtrise de la flore adventice  
en grandes cultures

2 décembre 2008

Actes



ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## **Comment intégrer la maîtrise de la flore adventice dans le cadre général d'un système de production intégrée ?**

**M. Bertrand<sup>1</sup>, T. Doré<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> : INRA, UMR d'Agronomie 211 INRA/AgroParisTech, BP1, 78850 Thiverval-Grignon, France

<sup>2</sup> : AgroParisTech, UMR d'Agronomie 211 INRA/AgroParisTech, BP1, 78850 Thiverval-Grignon, France

Correspondance : michel.bertrand@grignon.inra.fr

### **Résumé**

La production intégrée peut être définie comme un ensemble de principes et de raisonnements agronomiques visant à remplacer autant que possible l'utilisation des intrants de synthèse par d'autres interventions. Nous présentons tout d'abord plusieurs expériences de production intégrée ayant été conduites dans des essais annuels pour des itinéraires techniques, dans des essais de longue durée pour des systèmes de culture complets, ou chez des agriculteurs. Il ressort de cet inventaire que la question de la gestion des adventices donne le plus souvent lieu à des modifications limitées même dans le cas de productions mettant en œuvre des systèmes de culture profondément transformées. Ce constat est mis en regard des spécificités de la flore adventice dans le champ cultivé, et nous rappelons les conséquences des différentes techniques culturales mises en œuvre dans les systèmes de culture sur l'évolution de la flore adventice. Ce rappel permet de discuter les conséquences prévisibles des différentes évolutions actuelles des systèmes de culture, comme la simplification du travail du sol ou l'allongement des successions. En conclusion, les recherches à mener pour permettre une meilleure prise en compte de l'évolution de la flore adventice dans la conception de systèmes de cultures sont discutées.

### **Abstract**

Integrated production consists in substituting the use of chemical inputs by others technical interventions, using a set of agronomic reasoning and rules. In this paper, several studies of integrated production are first reported. The experiments were carried out for annual crops, in long term experiments, or were conducted by farmers. This review points out the lack of deep modifications in weeding practices in those trials, compared with the changes in nitrogen fertilisation or crop protection against diseases for example. This first conclusion is related to the characteristics of the weed flora. The relationships between the different technical practices, involved in cropping systems, and the evolution of the weed populations are presented. We therefore discuss how far the weed management must and can be adapted in new cropping systems following today the principles of integrated production. Finally, prospects for researches useful for integrating weed management in designing new cropping systems are discussed.

---

### **Introduction**

Les systèmes de culture doivent, en permanence, faire l'objet d'adaptations, de manière à mieux satisfaire les attentes que la société a vis-à-vis de son agriculture. Si on reste à un niveau très général, ces attentes sont les mêmes partout dans le monde : elles concernent la production alimentaire et non-alimentaire, la réalisation de services écologiques, la mise en œuvre d'une activité économique et

sociale. C'est bien sûr la déclinaison de ces grandes orientations selon les régions du monde, caractérisées par des milieux, des pressions sur les ressources, des besoins locaux, des contextes économiques très variés, qui entraîne la nécessité d'inventer des systèmes de culture nouveaux et différents selon les régions. Pour l'agriculture française, Meynard (2008) a récemment fait le point sur les attentes actuelles, environnementales, de compétitivité économique, d'insertion dans les filières et les territoires. Ces attentes imposent une transformation des systèmes, orientant l'agriculture vers des systèmes de production intégrée. L'objectif de cet article introductif est de dresser un panorama rapide de la manière dont la gestion des adventices peut s'intégrer dans les systèmes de production intégrée. Après avoir fait le point sur cette notion de production intégrée, nous présenterons la place de la gestion des adventices dans les expérimentations déjà menées sur la production intégrée, puis nous analyserons les obstacles à surmonter et les pistes de recherche à creuser pour parvenir à une meilleure intégration.

## La production intégrée, une idée toujours neuve

Qu'appelle-t-on la production intégrée ? Beaucoup d'utilisations sont faites de ce terme, mais avec des significations parfois différentes. Une des raisons en est que la définition de la production intégrée mélange des objectifs et des moyens, et que ces objectifs et ces moyens mobilisés dans la définition ont évolué au cours du temps.

Si on se réfère à la définition de l'OILB/SROP de 2004 (Boller *et al.*, 2004), « *la production intégrée est un système de production qui produit des aliments de haute qualité et d'autres matières premières en mobilisant les ressources et les mécanismes de régulation naturels pour remplacer les intrants polluants et sécuriser une agriculture durable. L'accent en production intégrée est mis sur :*

- *Une approche « holistique » des systèmes, qui fait de l'exploitation agricole l'unité de base*
- *Le rôle central des agro-écosystèmes*
- *L'équilibre des cycles des éléments minéraux*
- *Le bien-être des animaux d'élevage.*

*La préservation et l'amélioration de la qualité des sols, de l'environnement sous des composantes multiples, et de critères éthiques et sociaux, sont des composantes essentielles. Le recours à des méthodes biologiques, agronomiques et chimiques est pesé soigneusement en prenant en compte la protection de l'environnement, la rentabilité, et les exigences sociales. »*

Le concept de production intégrée n'est pas nouveau : il a émergé dans les années 1960 et 1970 comme un élargissement de la notion de protection intégrée des cultures. Comme cette dernière, il a cependant évolué : Boller *et al.* (2004) par exemple soulignent qu'entre 1992 et 2004, la définition de l'OILB a été modifiée pour prendre en compte les questions de qualité des produits d'une part, et de bien-être animal d'autre part. Et les termes de la définition ci-dessus admettent également des modifications dans le contenu de la production intégrée sans changement de la définition littérale : par exemple les composantes de l'environnement prises en considération sont évolutives – la préservation de la biodiversité et la prévention du changement climatique n'avaient pas il y a quinze ans le poids qu'on leur accorde aujourd'hui. Enfin, en ce qui concerne les moyens, la question de la valorisation de régulations à l'échelle du territoire prend de plus en plus d'importance pour la production intégrée des cultures (Deguine et Ferron, 2006) mais aussi globalement pour la production intégrée ce qui peut remettre en cause, ou tout au moins amener à compléter, la place centrale accordée à l'exploitation agricole. Enfin, annoncer que les trois dimensions de la durabilité doivent être soigneusement pesées ne dit en rien de quelle manière elles sont pondérées. Pour toutes ces raisons, on peut trouver chez les agriculteurs une variété de systèmes de production se réclamant de la production intégrée et qui pourtant ont des caractéristiques assez différentes. Pour faciliter notre propos, nous nous en tiendrons

néanmoins pour l'essentiel dans cet article à ce qui est tout de même un dénominateur commun de ces différentes traductions concrètes de la production intégrée : le remplacement « autant que possible » de l'utilisation des intrants chimiques de synthèse par d'autres modes d'intervention. Enfin, nous préférons dans cet article le terme de « gestion des adventices » plutôt que celui de désherbage. Ce dernier renvoie en effet quasi-exclusivement à la nuisibilité des « mauvaises herbes » ; or la question de la prise en compte des services écologiques (comme celui de ressource trophique pour les oiseaux et les insectes) rendus par les adventices, même si elle est encore peu renseignée, est de plus en plus fréquemment posée (Gerowitt *et al.*, 2003 ; Marshall *et al.*, 2003).

### **Dans les expériences de mise en oeuvre de la production intégrée, la protection contre les adventices reste un point sensible**

Comme on vient de le voir, le concept de production intégrée, même s'il est donc toujours en renouvellement, n'est pas récent. Il est dès lors intéressant d'identifier comment, dans les expériences de production intégrée menées au cours des dernières décennies, la question de la gestion des adventices a été traitée. Parmi les expérimentations sur la production intégrée rapportées dans la bibliographie, on peut distinguer deux catégories de situations : celles concernant la conduite d'une espèce donnée, pour lesquelles on se situe essentiellement à l'échelle du cycle cultural, et celles prenant en compte l'ensemble du système de culture, et abordant donc l'échelle pluriannuelle. On dispose aussi d'un petit nombre d'analyses de la mise en oeuvre pratique de la production intégrée chez les agriculteurs.

#### *Enseignements issus des expérimentations sur la production intégrée...*

A l'échelle d'une culture, les premiers travaux de l'INRA en grandes cultures ont porté sur la production intégrée du blé, et ont été initiés par Meynard (1985). Ils ont été construits avec pour objectifs (i) de limiter les problèmes environnementaux, dominés à l'époque par la question de la pollution azotée des eaux souterraines, et (ii) de trouver une autre piste de rentabilité de la culture dans un contexte d'évolution défavorable des prix de vente. Ces deux angles d'approche ont conduit à reconsidérer l'ensemble date / densité de semis, avec pour objectif de diminuer les niveaux de croissance en biomasse en sortie d'hiver et par là même de baisser les besoins en fertilisation, et l'exigence de protection contre les maladies fongiques. Le nouvel état de développement du couvert de blé obtenu, moins dense et implanté plus tardivement, a des répercussions défavorables sur les possibilités de compétition par la culture ; en revanche des semis plus tardifs rendent plus efficaces les épauements des stocks de semences par « faux-semis ». Toutefois, aucune modification des stratégies de gestion des adventices n'était envisagée dans ces travaux, car la dimension purement annuelle de la mise en expérimentation rendait peu pertinente la gestion du stock d'adventices, et ne permettait de toutes manières pas d'évaluer les conséquences d'éventuelles modifications (Saulas et Meynard, 1998). Le prolongement de ces travaux pour la production de blé à finalité énergétique (Loyce *et al.*, 2002) est resté fondé sur les mêmes principes de bases, même si les niveaux plus faibles de coûts de production recherchés pour cette destination d'agrocarburant pouvaient justifier une réduction des coûts de désherbage. Là encore, c'est l'échelle résolument annuelle des travaux qui a conduit à laisser de côté cet aspect de l'itinéraire technique.

La mise au point d'itinéraires techniques intégrés pour le colza à l'INRA a quant à elle été fondée sur un avancement des dates de semis permettant de modifier conjointement le bilan azoté et la protection de la culture contre les bioagresseurs (Dejoux *et al.*, 2003). L'utilisation d'une plus forte croissance automnale du colza pour lutter contre les adventices par étouffement, et permettre de réduire l'utilisation d'herbicides, a fait l'objet d'expérimentations (Valantin-Morison *et al.*, 2004). Une évaluation *a priori* de

la disponibilité en azote du milieu à l'automne, et sa valorisation par un semis précoce (Morison, 2007), permettent de diminuer le risque de développement des adventices et d'utiliser un programme de désherbage faisant l'impasse sur le traitement de pré-levée. Cette évolution s'accompagne toutefois d'une augmentation du risque d'attaque par le phoma qui en limite la praticabilité.

Dans l'ensemble de ces travaux sur des itinéraires techniques intégrés, en blé comme en colza, les modifications des pratiques de gestion de la flore paraissent très limitées par rapport à ce qui est mis en œuvre pour la fertilisation azotée ou la lutte contre les maladies par exemple. Le fait que les conséquences d'une modification du désherbage puissent s'exprimer à moyen voire long terme, donc au-delà de la durée de l'expérimentation, explique en partie cette frilosité.

Dans les essais "systèmes de culture" conduits sur l'ensemble des différentes cultures de la succession, l'appréciation des effets d'une modification des modes de gestion des adventices peut en revanche être approchée. Deux principaux essais de ce type menés par l'INRA sont disponibles en France. A Versailles dans l'essai dit de « La Cage » (Bertrand *et al.*, 2005 ; Debaeke *et al.*, 2008a), quatre systèmes sont comparés : système conventionnel, à bas niveau d'intrants (assimilable à de la production intégrée), sous couvert végétal et biologique. L'essai s'inscrit dans l'agriculture du Bassin Parisien, et maintient dans tous les systèmes un blé d'hiver une année sur deux, ce qui limite *de facto* les capacités à jouer sur la succession de culture pour satisfaire les objectifs de chacun des systèmes. Les variations dans les stratégies de gestion des adventices des différents systèmes choisies par les responsables de l'essai sont restreintes (si on écarte le cas du système biologique pour lequel seules les interventions mécaniques sont possibles). Pour le blé d'hiver et le pois, les traitements systématiques sont remplacés par des traitements à vue dans le système à bas niveau d'intrants. De même pour le colza, le traitement de pré-levée est supprimé dans le système à bas niveau d'intrants, le programme s'appuyant sur un renforcement de la compétitivité de la culture (semis précoce) et un traitement de rattrapage à vue. A Toulouse, un essai système de culture a été construit sur un raisonnement centré sur l'utilisation de quantités variables d'eau et de main-d'œuvre (Nolot et Debaeke, 2003). Trois systèmes correspondant à un accès plus ou moins limité à ces deux ressources sont comparés, se traduisant par des choix d'espèces de sensibilité à la sécheresse variables, et par différents degrés de rationnement de l'alimentation hydrique. Même si les successions sont modifiées ainsi que les dates de semis, les règles de décision en matière de gestion des adventices varient peu pour une espèce donnée. En revanche, l'effet des systèmes s'est traduit par des variations de l'état d'enherbement faisant qu'une même règle de décision peut conduire à traiter ou non suivant les systèmes.

On voit dans le raisonnement des deux essais INRA de Versailles et de Toulouse que les modifications apportées aux stratégies de gestion des adventices sont limitées, même quand on conduit ces changements techniques à une échelle de temps pluriannuelle qui devrait permettre la mise en œuvre et l'évaluation de stratégies de lutte, y compris dans leurs effets à moyen voire long terme. Cette évaluation est perturbée par les difficultés pratiques (lourdeur de l'échantillonnage, nécessaire expertise de reconnaissance des espèces) de quantification du stock de semences d'adventices, qui permet de caractériser le potentiel d'envahissement indépendamment de l'effet du climat sur les levées de mauvaises herbes. Plusieurs expérimentations menées à l'étranger peuvent être évoquées pour compléter cet aperçu de la place de la gestion des adventices dans la production intégrée. Des systèmes à bas niveaux d'intrants ont été comparés à des systèmes conventionnels dans deux expérimentations aux Etats-Unis. Poudel *et al.* (2002) introduisent ainsi des plantes de couverture pour limiter le développement des adventices, et Smith *et al.* (2007) changent la règle de décision pour autoriser des traitements à dose réduite au vu de l'état de la flore. Dans les deux cas, le raisonnement des modalités de désherbage est peu modifié entre système conventionnel et système à bas niveaux d'intrants. Smith *et al.* (2007) comparent également un système sans labour avec un système conventionnel, sans modifier les règles de désherbage. De même, Gerowitt (2003) conduit deux systèmes ayant une rotation diversifiée avec ou sans labour en appliquant les mêmes techniques de

contrôle. Teasdale *et al.* (2007) conduisent également deux systèmes non labourés utilisant ou non une plante d'interculture avec le même programme de désherbage ; seule l'introduction, dans un troisième système, d'une plante de couverture entraîne un allègement de l'utilisation d'herbicides.

On notera qu'il existe également un essai conduit à l'INRA à Dijon qui occupe une position particulière car, à l'inverse des essais de Versailles et Toulouse, il a mis en avant la question de la gestion des adventices. Il sera présenté plus en détail ultérieurement par Munier-Jolain *et al.* On peut toutefois noter qu'il ne s'agit pas d'une expérimentation de production intégrée, mais bien d'une évaluation de stratégies alternatives de maîtrise des adventices. Pour que ses résultats soient complètement utilisables dans le cadre de systèmes de production intégrée, il faut qu'ils soient replacés dans des systèmes de culture complets, c'est-à-dire que les stratégies de gestion des adventices évaluées comme intéressantes dans cet essai soient évaluées du point de vue de leur compatibilité avec les autres objectifs des systèmes de culture (en termes économiques et environnementaux) d'une part, et du point de vue de leurs interactions avec les autres dimensions de la gestion des cultures d'autre part – ce point sera discuté dans la troisième partie de cet article.

Finalement, on observe que même quand des systèmes radicalement différents sur le plan de leurs objectifs et des états de l'agrosystème qu'ils induisent sont mis en expérimentation, les programmes de gestion des adventices sont peu modifiés. La protection contre les adventices serait ainsi une sorte de « parent pauvre » de la production intégrée. On peut avancer plusieurs raisons pour l'expliquer. La première est la difficulté de l'expérimentation pluriannuelle sur les systèmes de culture, qui explique le faible nombre de sites expérimentaux, et donc de lieux où on peut expérimenter l'intégration de la gestion intégrée de la flore adventice dans des systèmes pluriannuels. Ce type d'expérimentation est coûteux en temps et en moyens, et il nécessite de faire des choix sur les successions de culture mises en expérimentation, ce qui peut paraître risqué dans un contexte de modifications rapides des choix d'assolement par les agriculteurs : les traitements expérimentaux risquent alors de paraître rapidement obsolètes. La seconde est certainement liée à la relative faiblesse du capital de connaissances nécessaire pour inventer des stratégies de gestion de la flore intégrée. La flore adventice est en effet par définition multi-spécifique (avec de plus une variabilité génétique intra-spécifique), son évolution quantitative et qualitative à l'échelle parcellaire est sensible à des modifications de nombreuses variables du milieu et des systèmes de culture, et sa gestion doit inclure par ailleurs une dimension paysagère. Si on ajoute que les connaissances malherbologiques ont pendant longtemps privilégié les domaines de la connaissance botanique, physiologique et génétique des espèces adventices, et celui de la lutte chimique, on conçoit que les connaissances disponibles ne soient pas complètement adaptées à la définition de stratégies de protection intégrée contre les adventices. Enfin, une troisième raison tient au faible état d'avancement de la modélisation de l'évolution des communautés d'adventices sous l'effet des systèmes de culture : alors que pour d'autres compartiments (nutrition hydro-minérale, gestion des états physiques du sol) de la conception de systèmes innovants, le recours à la modélisation est très courant, il n'est pratiquement pas encore mobilisable à l'heure actuelle pour la gestion des adventices, faute de modélisation adaptée.

### *... et de mise en œuvre chez les agriculteurs*

Les situations présentées ci-dessus concernaient des expérimentations menées pour l'essentiel en station expérimentale. Les enseignements même partiels qui en sont tirés, ainsi que ceux issus de travaux plus analytiques, ont amené à la définition de prototypes de stratégies de lutte contre les mauvaises herbes *a priori* utilisables en production intégrée, et appropriables par le développement et les agriculteurs. Dans certains cas (encore rares pour le moment), on dispose d'un suivi de cette appropriation (voir les exemples d'Agrotransfert Ressources et territoires en Picardie, et du réseau de fermes de Bourgogne mentionnés dans Debaeke *et al.*, 2008b). En Picardie, des conduites intégrées du blé ont été testées sur huit fermes pilotes, dans les conditions de la pratique agricole, entre 2002 et

2008. On observe une réduction progressive des densités de semis, de l'utilisation de fongicides et de régulateurs de croissance, sans incidence négative sur les résultats économiques. Pour l'emploi des herbicides, l'évolution est en revanche relativement peu visible, le nombre de passages étant maintenu (mais les matières actives utilisées ont changé), alors même que les systèmes conçus prévoyaient une baisse de leur emploi grâce à l'adoption d'un certain nombre de références issues de la recherche. Dans ces mises à l'épreuve dans les conditions de la pratique des agriculteurs, on se heurte à plusieurs difficultés de mise en œuvre (Mischler, com. pers.). Les premières sont liées aux impossibilités matérielles que rencontrent certains agriculteurs pour réaliser les ensembles techniques prévus : matériel non disponible (pour le désherbage mécanique), incompatibilité avec le calendrier de travail (cas de l'augmentation du nombre de déchaumages), incompatibilité avec les autres objectifs du système de culture (cas du choix des espèces constituant la succession, en premier lieu raisonné sur des critères de rentabilité économique), etc. Par ailleurs, il existe des difficultés liées à l'acceptation de la prise de risque : les conséquences d'une mauvaise maîtrise une seule année peuvent être si pénalisantes pour les années suivantes que tant que des solutions techniques existent pour "rattraper", par voie chimique, les situations dégradées, ces solutions apparaissent moins risquées.

Il n'est certes pas possible de généraliser à partir de ce seul suivi les difficultés d'adoption dans la pratique de stratégies de protection intégrée contre les adventices. Ce qu'il met en évidence est cependant convergent avec ce qui ressort d'échanges plus informels avec des professionnels : lorsque des stratégies de protection intégrée contre les adventices ont été élaborées, leur mise en œuvre par les agriculteurs, leur intégration dans des systèmes de culture en production intégrée, n'est pas immédiate – alors même qu'on en est resté à une définition assez basique de la production intégrée. Il est dès lors légitime de s'intéresser de plus près à cette question des capacités d'intégration de la maîtrise des adventices dans la production intégrée, et d'accorder toute l'attention nécessaire au point suivant : comment mettre au point des stratégies de protection intégrée contre les adventices qui préservent la diversité des objectifs de la production intégrée, et qui soient compatibles avec la variabilité des situations pédoclimatiques et socio-économiques qui caractérise la réalité agricole ?

### **Maîtrise des adventices et production intégrée, quelle compatibilité, quelles difficultés ?**

Les éléments qui singularisent la gestion des adventices par rapport au reste de la conduite d'un système de culture sont les suivants :

- Les actions qui jouent sur les populations d'adventices dans une parcelle une année donnée ont une influence déterminante sur les populations des années suivantes, en raison d'une part de la forte capacité de conservation des espèces adventices, et d'autre part de la fraction en général très faible que représente sur le plan quantitatif l'apport annuel de graines en provenance d'individus extérieurs à la parcelle.
- L'objet même dont il est question (« les adventices ») est un objet particulièrement composite (« les adventices » dans un champ, ce sont plusieurs espèces, avec une hétérogénéité génétique au sein de chaque espèce présente).
- Cet objet est lui-même très variable et peut être radicalement différent sur deux parcelles voisines.
- A l'intérieur d'une parcelle, il existe une très forte hétérogénéité spatiale des communautés d'adventices, tant en termes d'espèces présentes que d'effectifs.

- La nature de cet objet varie au cours du temps, avec possibilité d'apparition et de disparition d'espèces dans une même parcelle, ou modification de la structure génétique des populations des différentes espèces présentes.

Par ailleurs, comme nous allons l'expliciter dans le paragraphe suivant, l'évolution des communautés d'adventices dépend de multiples éléments de conduite agronomique.

### *Influence des systèmes de culture et de leur organisation dans l'espace sur les communautés d'adventices*

C'est un des éléments de base de l'agronomie que de considérer qu'une même composante du milieu, qu'elle soit physique, chimique ou biologique, dépend de multiples actes techniques, et pas seulement de ceux qui sont raisonnés pour gérer cette composante. Ainsi, la structure du sol dépend non seulement des passages d'outils de travail du sol, mais également des autres passages d'engins induisant des tassements, ou encore du choix des espèces cultivées dont la croissance et le fonctionnement du système racinaire vont plus ou moins permettre une augmentation de la porosité. D'une manière similaire, la quantité d'azote minéral présent dans l'horizon labouré à une date donnée dépend de la quantité d'engrais azoté apporté, mais aussi de toutes les techniques qui jouent sur la masse, la composition, et la vitesse de dégradation des matières organiques dans le sol. Et c'est un des objectifs scientifiques de l'agronomie que de quantifier ces processus et leurs interactions, afin d'être capable d'évaluer et de prévoir l'évolution des champs cultivés sous l'effet des techniques.

Qu'en est-il pour les communautés d'adventices ? Cette composante biologique de l'agrosystème n'échappe pas à la règle. L'état d'une communauté dans une parcelle à un instant donné, caractérisé par la nature des espèces présentes, leur structure génétique, et les effectifs de chaque population, est affecté par la majorité des décisions techniques que prend un agriculteur. Ces décisions jouent (i) directement sur la disparition des individus (mortalité), (ii) sur le changement de stade (par exemple levée de dormance, mise en condition de germination favorable), qui fait passer les individus d'un stade insensible à une technique à un stade sensible à cette technique, (iii) sur la sélection progressive des espèces et génotypes insensibles ou moins sensibles à l'application d'une technique létale, (iv) sur l'introduction de nouvelles espèces dans la communauté. On peut synthétiser ces effets des techniques mises en oeuvre par les agriculteurs sur les communautés de la manière suivante (pour plus de détails voir par exemple Aubertot *et al.*, 2006) :

- Les techniques de désherbage ont pour fonction essentielle et souvent unique de diminuer les effectifs des espèces d'adventices. L'efficacité immédiate (mesurée par le taux de mortalité des adventices) de ces techniques dépend de nombreuses conditions, en particulier des conditions climatiques mais également du stade des individus au moment de l'application de la technique ; les différentes méthodes de désherbage (chimique, mécanique, thermique, biologique) ont également des spectres d'efficacité différents. Leur efficacité à plus long terme dépend de la date d'application de la technique par rapport aux phases de production d'organes de dissémination viables.
- Indépendamment des passages d'outils qui ont pour objectif l'élimination mécanique des adventices (hersage, binage), tout passage d'outil sur le sol est susceptible de modifier les populations d'adventices par trois processus : (i) la modification du positionnement des organes de reproduction dans le profil de sol, déterminant pour le déclenchement de changements de stade, voire pour la survie de ces organes, (ii) leur mise en conditions favorables à la reprise de végétation (organes végétatifs) ou à la germination (graines), (iii) la mortalité directe lors du passage de l'outil sur une plantule.

- Toutes les techniques qui vont modifier l'environnement des individus en croissance vont jouer sur l'évolution des populations d'adventices, en modifiant les quantités de facteurs de croissance mis à leur disposition, et les conditions de cette croissance. Ainsi, la structure du couvert végétal de la plante cultivée (dépendant de l'ensemble date/densité/géométrie de semis, mais aussi de la variété semée) déterminera la quantité et la qualité du rayonnement disponible pour la croissance des mauvaises herbes ; le régime de fertilisation et d'irrigation jouera sur la quantité d'eau et d'éléments minéraux disponibles pour cette croissance, en interaction avec les caractéristiques du peuplement cultivé déterminant sa propre demande ; le choix de variétés cultivées à capacités allélopathiques peut perturber la croissance des adventices (Belz, 2007), ou encore la protection contre les maladies et ravageurs des cultures peut modifier les communautés d'insectes et de champignons jouant sur la croissance des adventices ou sur la prédation, etc. Ces phénomènes de compétition, allélopathie, et dans certains cas parasitisme, peuvent entraîner un effet immédiat (mortalité des individus en croissance par ombrage par exemple), ou différé (non atteinte des stades reproducteurs, jouant sur les effectifs à plus long terme).
- La nature et l'ordre des cultures se succédant sur une parcelle ont un rôle majeur, à la fois direct et indirect. Direct, parce que le calendrier cultural, se traduisant par la période d'occupation du sol par chaque culture, déterminera les conditions de croissance que rencontre une espèce donnée au moment de son émergence, elle-même fonction des caractéristiques écologiques de l'espèce (saisonnalisation plus ou moins marquée et variable selon les espèces). Indirect, car à telle ou telle culture est associée tel ou tel ensemble possible de techniques (modalités de travail du sol, de fertilisation), dont les effets ont déjà été évoqués ci-dessus ; ou parce que le choix de la culture rend ou non possible l'application de telle ou telle technique de désherbage (par exemple passages répétés d'outils de travail du sol superficiel à l'automne). L'ordre est évidemment important, car il est susceptible d'induire des phénomènes cumulatifs favorables ou non à la croissance des populations d'adventices.
- En modifiant l'échelle d'approche, la position de la parcelle dans un ensemble géographique plus vaste et la gestion de ce territoire englobant la parcelle (gestion des bordures, positionnements respectifs des différentes parcelles d'une même culture dans un parcellaire donné) est susceptible de modifier quantitativement et qualitativement la flore d'une parcelle donnée, en raison des transferts latéraux d'organes de dissémination et de pollen (voir un exemple récent dans Suter (2007)).

Ces effets des choix techniques regroupés ici en quelques catégories ne sont évidemment pas univoques, et dépendent d'une part des interactions entre techniques, et d'autre part des interactions avec les conditions climatiques. La complexité de l'ensemble qu'ils représentent montre qu'il n'y a aucune chance pour qu'un système innovant dans lequel la gestion des adventices n'a pas été prise en compte soit systématiquement favorable pour cette composante ; et inversement qu'une stratégie de gestion des adventices aussi finement pensée soit-elle soit naturellement en adéquation avec les autres éléments du système de culture.

### *Tendances d'évolution des pratiques en production intégrée et conséquences pour la maîtrise des adventices*

Au-delà de la lutte mécanique pour remplacer la lutte chimique, qui peut ne pas être toujours efficace (Chicouene, 2007 ; van der Weide *et al.*, 2008), ces différents effets des systèmes de culture ou de leur agencement dans l'espace représentent un gisement de leviers sur lesquels jouer pour maîtriser les populations d'adventices en minimisant le recours aux intrants chimiques, tout en satisfaisant différents objectifs de production et environnementaux. Et les travaux en la matière n'ont pas manqué au cours

des dernières années tant à l'INRA que dans d'autres organismes, mettant l'accent sur la nécessité de combiner plusieurs techniques de prévention et de contrôle pour parvenir à des résultats de maîtrise satisfaisants tant sur le court terme que sur le long terme. On peut ainsi citer les travaux et réflexions de Munier-Jolain *et al.* (2002) ; ou encore ceux de Buhler *et al.* (2000), Davis (2006), Anderson (2007), Avola *et al.* (2008), Sanyal *et al.* (2008). Mais dans ces travaux, on retrouve souvent l'isolement de la maîtrise des adventices, dont on fait un sujet à part ; les conséquences de ces systèmes sur d'autres dimensions que l'évolution de la flore ne sont pas étudiées, ou seulement sur un tout petit nombre de critères (Chikowo *et al.*, 2008). Or, si on améliore sensiblement la gestion des communautés d'adventices en développant une protection intégrée contre les adventices, mais qu'en même temps on dégrade les autres performances des systèmes de culture, la protection intégrée contre les adventices n'aura pas d'avenir – ou alors seulement dans les situations extrêmement dégradées (voir par exemple Chauvel *et al.*, 2001), où le problème adventice est tel qu'il devient premier et que l'amélioration générale du système passe d'abord par le règlement de ce problème, quel qu'en soit le coût temporaire. C'est donc vers une protection contre les adventices intégrée au sens où elle recourt à moins d'intrants de synthèse, mais aussi au sens où elle doit être intégrée à l'ensemble d'un système vertueux, qu'il faut aller (Buhler, 2002). Y a-t-il des difficultés majeures dans cette démarche ?

Un travail beaucoup plus approfondi que celui auquel cette introduction brève peut prétendre serait à mener, afin d'identifier si les tendances de modification de pratiques qui caractérisent les systèmes se réclamant de la production intégrée posent ou non des problèmes de compatibilité avec la protection intégrée contre les adventices. Ce travail devrait d'ailleurs être évolutif car, on l'a vu, la production intégrée n'est pas un ensemble de paquets techniques normatifs, mais plutôt un ensemble de principes se traduisant par des mises en œuvre pratiques adaptées aux conditions locales – la traduction étant loin d'être complète et ne pouvant pas être considérée comme acquise une fois pour toutes. On peut néanmoins ébaucher une première esquisse.

Une première tendance de la production intégrée consiste à raisonner davantage les successions culturales (en incluant les espèces d'interculture), dans les systèmes à base d'annuelles. Les objectifs concernent la gestion des populations de différents bioagresseurs (en particulier champignons et insectes, mais aussi mollusques), ainsi que l'alimentation minérale (alimentation azotée en particulier avec le rôle des Légumineuses et celui des cultures pièges à nitrate), mais aussi la satisfaction de différents objectifs environnementaux (lutte contre l'érosion et la pollution nitrique, préservation de la biodiversité). Quand elle se traduit par une augmentation de la diversité des cultures, cette tendance est plutôt favorable à la gestion intégrée des adventices (mais des contre-exemples existent, par exemple Brainard *et al.*, 2008), tant il est vrai *a contrario* que la monotonie des successions engendre des sélections de flore difficiles à maîtriser. La diversité « moyenne » est importante, mais l'ordre dans lequel se succèdent les cultures l'est aussi, comme le signale par exemple Anderson (2007). Par ailleurs, l'agencement spatial des espèces présentes est aussi un levier potentiellement utilisé en production intégrée. Cela comprend l'introduction de plantes de couverture sur des cultures pérennes (vergers, vignes), mais aussi sur des cultures annuelles ; ainsi que l'utilisation de mélanges de variétés d'une espèce, ou d'espèces différentes au sein d'une même parcelle (mélanges Graminacées/Légumineuses en particulier, qui modifient l'occupation de l'espace et le rayonnement qui parvient au niveau du sol). En cultures pérennes, le rôle positif des couverts herbacés vis-à-vis de la gestion des mauvaises herbes semble acquis ; en cultures annuelles, le recul n'est pas encore suffisant pour pouvoir vraiment conclure.

Une seconde tendance porte sur la simplification du travail du sol, ce qui présente certains intérêts sur le plan énergétique, sur celui de la gestion des éléments minéraux et de certains bioagresseurs, et sur celui de la limitation du ruissellement et de l'érosion. Les conséquences sur les adventices et leur gestion de cette simplification du travail du sol, qui peut prendre des formes très diverses, ont été étudiées par de très nombreux auteurs. L'idée communément avancée est que la simplification du travail du sol rend plus difficile la gestion des mauvaises herbes, en particulier sans recours aux

herbicides. Beaucoup de résultats expérimentaux vont dans ce sens. Mais pour autant, un travail du sol superficiel peut dans certains cas entraîner un moins bon contrôle qu'un semis direct (Melander *et al.*, 2008) ; et les résultats sont de toutes manières extrêmement variables. La conclusion générale de l'ensemble des travaux menés sur le sujet est que les effets de la simplification du travail du sol vont dépendre de l'interaction entre le type de travail du sol réalisé (nature des outils, fréquence des passages), les conditions de travail, et les caractéristiques écologiques des adventices présentes dans la banque de graines de la parcelle travaillée.

Un élément important de la production intégrée passe aussi par une modification des calendriers culturaux, souvent en association avec le raisonnement de l'ensemble date de semis/densité de semis/choix de variété. Un exemple typique est le recul des dates de semis de céréales, permettant de limiter l'emploi de fongicides et insecticides, souvent associé à des plus faibles densités de semis, l'ensemble permettant une moindre utilisation d'engrais azoté. Ici encore, les conséquences de ces choix sur les communautés d'adventices vont dépendre de la flore présente. Si les espèces majeures sont automnales, des semis différés permettent leur élimination par des travaux du sol avant semis ; si elles sont à germination plus tardive, cette élimination précoce sera impossible, et au contraire le choix d'une faible densité sera plutôt défavorable. Le décalage de semis n'est pas toujours dans le sens d'un retard : au contraire dans le cas de la culture du colza, on assiste plutôt à un avancement de la date de semis, permettant notamment un échappement à certaines maladies et une meilleure capture des reliquats azotés ; dans ce cas de figure, les effets sur la flore adventice sont en général favorables à une diminution de l'emploi des herbicides, car la compétitivité de la culture est accrue, ce qui joue à la fois sur la mortalité directe et sur la capacité des adventices à produire des graines (Sim *et al.*, 2007a). Le choix de la variété est très souvent couplé à celui de la date de semis, en prenant en considération des questions de sensibilité au froid et à la photopériode, mais aussi, dans le cadre d'une stratégie de production intégrée, en valorisant au mieux les résistances variétales aux insectes et surtout aux maladies. Les conséquences sur la flore de ce choix de variétés adaptées à la production intégrée n'ont pas été analysées de manière fine ; comme le suggèrent Sim *et al.* (2007b), le critère d'aptitude à la compétition vis-à-vis des adventices mériterait d'être considéré lors des programmes de sélection au moins sur des espèces comme le colza, car l'effet variété existe également sur la production grainière.

Enfin, la production intégrée passe par une diminution de l'emploi des pesticides, entre autres fongicides et insecticides, et souvent à l'heure actuelle par une diminution de la quantité d'engrais azotés apportés voire de la quantité d'azote minéral présent dans le système. Les conséquences de ces éléments de la production intégrée en termes de gestion des adventices sont encore peu documentées. La moindre utilisation de pesticides pourrait amener à une plus forte prédation de graines en fin de cycle, et une plus forte mortalité des adventices due à des maladies, mais nous n'avons pas de connaissance de travaux sur cette question. En ce qui concerne la disponibilité en azote, les études sont encore très fragmentaires (voir par exemple Berger *et al.*, 2007).

## Conclusion

En conclusion, on peut considérer que la prise en compte de la gestion des adventices dans la production intégrée est amorcée, mais encore imparfaite. Les particularités de cette composante biologique, croisées avec le manque de travaux menés sur les temps longs en agronomie, en sont largement à l'origine. Toutefois, les principales orientations des recherches à mener pour progresser dans cette intégration sont maintenant assez clairement identifiées, et sont déjà travaillées, à l'INRA et ailleurs. On peut les résumer de la manière suivante :

- Augmenter le capital de connaissances sur les effets des pratiques prises une par une et en interaction sur les variables caractéristiques de la flore (démographie, évolution génétique).

- Construire et évaluer à partir de ces connaissances des stratégies pluriannuelles de gestion des adventices permettant d'atteindre une gamme d'objectifs en termes de flore.
- Identifier comment ces stratégies peuvent être adaptées de manière à être intégrées, sans perdre leurs intérêts, dans des systèmes de culture et de production correspondant à la diversité des conditions de production.

Pour chacune de ces orientations, la modélisation aura certainement un rôle central.

### Références bibliographiques

Anderson R.L., 2007. Managing weeds with a dualistic approach of prevention and control. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 13-18.

Aubertot J.N., Colbach N., Félix I., Munier-Jolain N., Roger-Estrade J., 2006. La composante biologique. In : T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*, QUAE Editions, Paris, p. 199-224.

Avola G., Tuttobene R., Gresta F., Abbate V., 2008. Weed control strategies for grain legumes. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 389-395.

Belz R.G., 2007. Allelopathy in crop/weed interactions - an update. *Pest Management Science* 63, 308-326.

Berger A., McDonald A.J., Riha S.J., 2007. Does soil nitrogen affect early competitive traits of annual weeds in comparison with maize? *Weed Research* 47, 509-516.

Bertrand M., Guichard L., de Tourdonnet S., Saulas P., Picard D., 2005. Evaluation of the agronomic, economic and environmental impacts of no-tillage cropping systems. Results of a long-term experiment in France. *Proceedings of the III World Congress on Conservation Agriculture*. Nairobi, Kenya.

Boller E.F., Avilla J., Joerg E., Malavolta C., Wijnands F.G., Esberg P., 2004. Integrated production ; principles and technical guidelines. *IOPC wprs Bull.*, 27(2).

Brainard D.C., Bellinder R.R., Hahn R.R., Shah D.A., 2008. Crop rotation, cover crop, and weed management effects on weed seedbanks and yields in snap bean, sweet corn, and cabbage. *Weed Science* 56, 434-441.

Buhler D.D., 2002. Challenges and opportunities for integrated weed management. *Weed Science* 50, 273-280.

Buhler D.D., Liebman M., Obrycki J.J., 2000. Theoretical and practical challenges to an IPM approach to weed management. *Weed Science* 48, 274-280.

Chauvel B., Guillemin .P., Colbach N., Gasquez J., 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection* 20, 127-137.

Chicouene D., 2007. Mechanical control of weeds. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 19-27.

Davis A.S., 2006. When does it make sense to target the weed seed bank? *Weed Science* 54, 558-565.

Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J. M., Faloya V., Saulas P., 2008a. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *Agronomy for Sustainable Development*, sous presse.

Debaeke P., Petit M.S., Bertrand M., Mischler P., Munier-Jolain N., Nolot J.M., Reau R., Verjux N., 2008b. Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes ? In : R. Reau, T. Doré (Eds.), *Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éditions, Dijon, p. 149-168.

- Deguine J.P., Ferron P., 2006. Protection des cultures, préservation de la biodiversité, respect de l'environnement. Cahiers Agricultures 15, 307-311.
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., Roche R. Saulas P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. Agronomie 23, 725-736.
- Gerowitt B., 2003. Development and control of weeds in arable farming systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 98, 247-254.
- Gerowitt B., Bertke E., Hespelt S.K., Tute C., 2003. Towards multifunctional agriculture - weeds as ecological goods? Weed Research 43, 227-235.
- Loyce C., Rellier J. P., Meynard J. M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. Agricultural Systems 72, 33-57.
- Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R., Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. Weed Research 43, 77-89.
- Melander B., Holst N., Jensen P.K., Hansen E.M., Olesen J.E., 2008. *Apera spica-venti* population dynamics and impact on crop yield as affected by tillage, crop rotation, location and herbicide programmes. Weed Research 48, 48-57.
- Meynard J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Doctorat, INA P-G, Paris, France, 297 pp.
- Meynard J.M., 2008. Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. In : R. Reau, T. Doré (Eds.), Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éditions, Dijon, p. 11-27.
- Morison M, 2007. Conduite intégrée du colza d'hiver pour une réduction de l'utilisation des pesticides. Rapport MEDD, 64 pages.
- Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. Weed Research 42, 107-122.
- Nolot J.M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. Cahiers Agriculture 12, 387-400.
- Poudel D.D., Horwath W.R., Lanini W.T., Temple S.R., van Bruggen A.H.C., 2002. Comparison of soil N availability and leaching potential, crop yields and weeds in organic, low-input and conventional farming systems in northern California. . Agriculture, Ecosystems and Environment 90, 125-137.
- Sanyal D., Bhowmik P.C., Anderson R.L., Shrestha A., 2008. Revisiting the perspective and progress of integrated weed management. Weed Science 56, 161-167.
- Saulas P., Meynard J.M., 1998, Production intégrée et extensification sont elles compatibles ? Cas des céréales à paille. Dossier de l'environnement de l'INRA 16, 9-15.
- Sim L.C., Froud-Williams R.J., Gooding M.J., 2007a. The influence of winter oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera* var. *biennis*) canopy size on grass weed growth and grass weed seed return. Journal of Agricultural Science 145, 313-327.
- Sim L.C., Froud-Williams R.J., Gooding M.J., 2007b. The influence of winter oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera* var. *biennis*) cultivar and grass genotype on the competitive balance between crop and grass weeds. Journal of Agricultural Science 145, 329-342.
- Smith R.G., Menalled F.D., Robertson G.P., 2007. Temporal yield variability under conventional and alternative management systems. Agronomy Journal 99, 1629-1634.
- Suter M., Siegrist-Maag S., Connolly J., Lüscher A., 2007. Can the occurrence of *Senecio jacobaea* be influenced by management practice? Weed Research 47, 262-269.
- Teasdale J.R., Coffman C.B., Mangum R.W., 2007. Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. Agronomy Journal 99, 1297-1305.

Valantin-Morison M., Ferré F., Quéré L., 2004. Améliorer la compétitivité du colza d'hiver vis-à-vis des adventices et réduire l'utilisation d'herbicides. *Oléoscope* 77, 17-19.

Van der Weide R.Y., Bleeker P.O., Machten V.T.J., Lotz L.A., Fogelberg F., Melander B., 2008. Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Research* 48, 215-224.

## **Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies : vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture**

**G. Fried<sup>1</sup>, B. Chauvel<sup>2</sup>, X. Reboud<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>: LNPV, Station d'entomologie, SupAgro Bâtiment 18, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 01, France

<sup>2</sup>: INRA, Unité Mixte de Recherche n°1210, INRA, Univ. Bourgogne, ENESAD, Biologie et Gestion des Adventices", 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon cedex, France

Correspondance : Xavier.Reboud@dijon.inra.fr

**Résumé :** L'intensification des pratiques culturales depuis le début de 20<sup>ème</sup> siècle a eu un impact important sur la composition des communautés de mauvaises herbes. Les espèces adventices observées aujourd'hui sont issues de processus de sélection multiples et parfois différents voire opposés d'une culture à une autre. Depuis la seconde guerre mondiale, le développement de nouvelles cultures associé au désherbage chimique, a parfois contribué à renforcer une spécialisation des flores par culture. Cependant, l'intensité du désherbage chimique et l'augmentation de la fertilisation azotée a surtout banalisé la flore, sélectionnant les espèces généralistes les plus nitrophiles et compétitives au détriment des espèces spécialistes de milieux pauvres ou particuliers (sableux, humides ou calcaires). Globalement, les parcelles cultivées hébergent aujourd'hui moins d'espèces qu'il y a 30 ans et à une densité moyenne bien plus faible. D'autres guildes dépendantes des adventices pourraient en pâtir. A l'avenir, la mise en place d'une agriculture basée sur une réduction des intrants va obligatoirement favoriser une nouvelle évolution de cette flore. Limiter les effets négatifs des communautés de mauvaises herbes tout en entretenant la diversité de ces communautés végétales constitue un objectif agronomique ambitieux mais devant être atteint par les agricultures de demain.

### **Abstract**

The intensification of agricultural practices during the last century has strongly impacted weed communities. The weed species that are now more commonly observed are those that have taken benefit from the multiple and complex selection pressures attached to the changes of agriculture and management of the agricultural landscape such as the increasing use of herbicides and fertilizers or the introduction of new crops over large areas. In response to these changes, weed species with characteristics of 'generalist' have largely increased; in parallel, specialized guilds of weed species have emerged enhanced by the recurrent cultivation of crops they are well adapted to. These changes in the weed flora have occurred at the expense of the guild of weed species that are adapted to poor (oligotrophic?) or more extreme environments. This group has largely declined and is now at the verges of getting extinct. Overall over the last 30 years, these different processes have led to a 44% decline in weed diversity found in each field while the mean plant density decreased by 67% with possible incidences on other guilds of parasitic plants, microbes and animals of the agroecosystem feeding on weeds. The possibility to combine the double objective of maintaining high production and better sustainability in agriculture is thus questioned. Weeds are a good model to assess the impacts of agricultural changes and monitoring networks, although expensive, are of primary importance to identify and precisely quantify the biological changes occurring in agroecosystems.

## Les différentes échelles temporelles de fluctuation de la végétation adventice

Dans tous les milieux, la composition de la végétation fluctue au cours des saisons, entre les différentes années successives ou de façon plus perceptible sur le long terme. Au cours d'une même année, la flore varie en fonction du cycle de développement des espèces en relation avec les variations climatiques saisonnières. Dans les champs cultivés, ces variations sont également déterminées par la croissance de la culture et les pratiques culturales associées (Barralis et Chadoeuf, 1980). Une des particularités des cultures annuelles est la disparition complète de la végétation entre deux cultures successives. Mais si les perturbations détruisent la végétation au moment de la moisson ou du labour suivant, tous les « compteurs » ne sont pas pour autant remis à zéro : les semences produites par les plantes non détruites au cours de la saison dans la culture ou l'interculture vont réalimenter le stock de semences du sol. La répétition des mêmes phénomènes de sélection d'année en année peut alors rapidement amplifier les différences entre espèces enrichissant ou épuisant leur stock et, ainsi, modifier au cours du temps la composition de la communauté. A l'échelle de quelques années, on attend donc, par exemple, des flores différentes dans des systèmes conduits en monoculture ou en rotations plus ou moins complexes (Marty *et al.*, 1980). A plus long terme (quelques décades, siècles voire millénaires), des pressions de sélection (changements climatiques, apparition de nouveaux prédateurs, etc.) et la migration d'espèces à l'échelle biogéographique peuvent également modifier la composition des flores.

Différents phénomènes laissent penser que ces processus de changement de végétation n'ont pu que s'accélérer avec la révolution de l'agriculture. Au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, l'intensification des pressions de sélection avec la mécanisation du travail du sol et l'utilisation des herbicides de synthèse a abouti à une évolution des populations de mauvaises herbes parfois perceptibles sur des pas de temps très courts (Gasquez, 1984 ; Jauzein, 2001). Les migrations d'espèces ont été facilitées avec l'augmentation des volumes d'échanges commerciaux (semences de cultures) et aujourd'hui environ 40 % de la flore adventice présente en France est dite 'néophyte' (Jauzein, 2001). Ce terme englobe toutes les espèces exotiques introduites accidentellement ou intentionnellement depuis la découverte des Amériques.

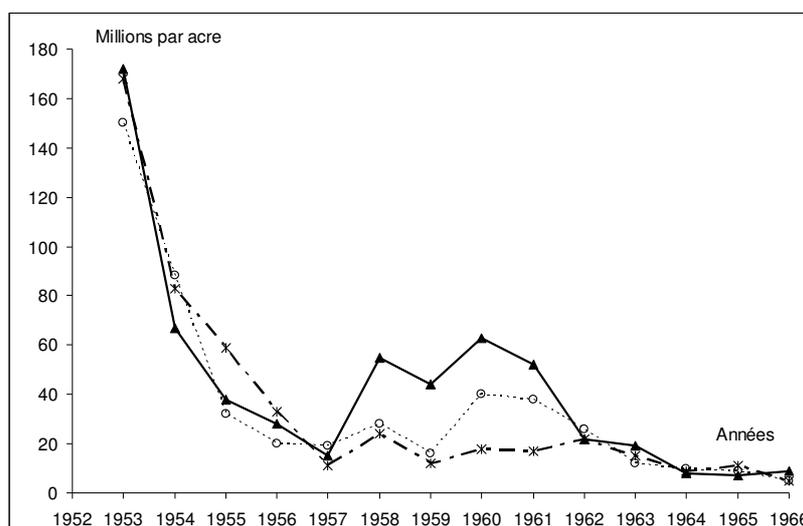
Après une rapide synthèse de l'évolution des espèces présentes dans les champs cultivés depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, cet article a pour objectif de souligner le rôle majeur des pratiques culturales dans l'évolution des communautés de mauvaises herbes. Qu'elles aient été pensées ou non dans le seul but de contrôler spécifiquement la flore adventice, ce travail montre que l'intensification des interventions culturales au cours des trente dernières années a pu i) sélectionner des groupes d'espèces qui répondent à des critères particuliers, ii) entraîner une homogénéisation des types d'espèces présents et iii) amener une réduction globale de la biodiversité végétale. Aussi, suivre pour mieux prévoir l'évolution de la biodiversité de la flore adventice dans le nouveau contexte agricole apparaît comme un objectif majeur de valorisation des agro-écosystèmes.

## De nombreux changements ont émaillé l'évolution de la flore adventice au cours du 20<sup>ème</sup> siècle.

La présence d'une mauvaise herbe étant à la fois liée à un environnement écologique (sol, climat) et à un environnement agronomique (pratiques culturales), c'est à travers le changement de ces environnements que l'on peut tenter de quantifier les impacts des évolutions de l'agriculture. Les premiers changements de flore dans les champs cultivés perçus par les botanistes remontent au début des années 1900. Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'amélioration du tri des semences cultivées a entraîné la régression rapide d'espèces nuisibles telle que la cuscute, mais aussi des espèces très inféodées aux cultures du fait notamment d'une forte ressemblance de la semence de la culture et de la mauvaise

herbe. C'est par exemple le cas des espèces liées à la culture du lin<sup>1</sup> (caméline du lin<sup>2</sup>, gaillet bâtard, ivraie du lin, moutarde découpée) pour lesquelles la disparition progressive des champs de lin de nombreuses régions a fini par entraîner la quasi disparition. L'intensification de l'utilisation des fumures après la première Guerre mondiale a entraîné le début de la régression de la flore la plus oligotrophe<sup>3</sup> et «nitrofuge<sup>4</sup>» (spergulaire des moissons, cotonnière de France, etc.) (Meerts, 1997). Les changements de flore ont été nettement plus sensibles après 1950 avec la généralisation du désherbage chimique et l'intensification du travail du sol (Figure 1).

**Figure 1.** Diminution constatée du stock de semences viables d'espèces adventices de trois parcelles dans les 15 premiers centimètres entre 1953 et 1966 (d'après Roberts, 1968).



Dès 1960, les botanistes font état d'une forte régression des populations d'espèces messicoles<sup>5</sup> (Tableau 1) : pied d'alouette, gagée des champs, nigelle des champs, nielle des blés et jugent déjà la situation comme « grave » (Aymonin, 1962 ; Aymonin, 1976). Au cours de la même période, les malherbologues français notent la progression des graminées (vulpin des champs, jouet du vent, folle avoine) non touchées par les premières molécules herbicides : 2,4-D, MCPA, etc. (Montégut, 1997) et largement dispersées par les nouvelles moissonneuses batteuses.

Derrière ces observations maintes fois citées en exemple lorsque l'on évoque les changements de flore dans les cultures, il manque souvent un suivi détaillé, des données quantitatives précises, voire des approches (modernes) d'écologie permettant de mieux analyser et comprendre les mécanismes de sélection de cette flore. Une compréhension fine des processus est pourtant nécessaire si on cherche à prévoir et à mieux anticiper les futurs changements de flore qui pourraient suivre la réduction de l'application des herbicides, un plus fort pourcentage de parcelles conduites en agriculture biologique tel que préconisé par le 'Grenelle' de l'environnement ou encore l'éventuelle mise en place de cultures génétiquement modifiées ou de nouvelles cultures de type bioénergétique.

<sup>1</sup> Espèces dites linicoles

<sup>2</sup> Les noms français sont issues de la Flore des champs cultivés (Jauzein, 1995) dans laquelle on pourra trouver la correspondance avec le nom scientifique.

<sup>3</sup> Se dit d'une espèce qu'on rencontre sur les sols pauvres

<sup>4</sup> Se dit d'une espèce qui ne supporte pas les fortes fumures azotées

<sup>5</sup> Guilde des espèces rencontrées dans les champs de blé

**Tableau 1.** Evolution de la fréquence et de l'abondance de quelques messicoles près de Nemours des années 1940 à 1970 (d'après Aymonin, 1976).

Espèces	Avant 1940		1950-1960		1960-1970	
	FR	AB	FR	AB	FR	AB
<i>Adonis</i> sp.	+	+/-	-	--	---	---
<i>Consolida regalis</i>	+++	+++	++	+	-	--
<i>Nigella arvensis</i>	-	+++/+	loc.	+/-	---	--
<i>Agrostemma githago</i>	++	isolé	---	---	---	---
<i>Valerianella</i> spp.	++	++	+	+	--	---
<i>Turgenia latifolia</i>	+	-	--	--	---	---
<i>Bromus arvensis</i>	++	+++	+	+	--	+
<i>Gagea arvensis</i>	-	++	-	1 fois	?	éteint

FR (fréquence) : +++, ++, + : très fréquent, fréquent, assez fréquent ; -, --, --- : assez rare, rare, très rare ;  
 AB (abondance) : +++, ++, +, -, -- : degré d'abondance = très, assez, peu, très peu

### Les activités agricoles bouleversent la composition et la diversité des flores.

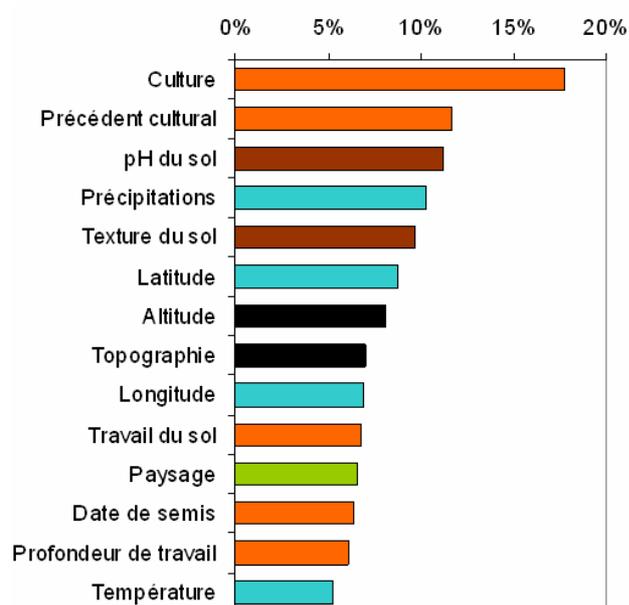
Comme pour les autres communautés végétales, la composition de la flore adventice est dépendante des conditions pédo-climatiques. Les champs de la zone méditerranéenne hébergent une flore particulière : la knautie à feuilles entières, le réséda raiponce ou encore le rapistre rugueux sont par exemple communes dans le Midi et presque absentes dans le nord. De nombreuses espèces restent très largement inféodées aux sols siliceux acides (radis sauvage, spergule des champs ou scléranthe annuel) ou argilo-calcaires (caucalis à fruits larges, peigne de Vénus). Cependant, il suffit de comparer les mauvaises herbes de deux parcelles cultivées voisines pour comprendre que les pratiques culturales peuvent aussi avoir une influence sur la flore. Si tous ces facteurs ont une influence, quel est leur poids relatif ? Quelle trajectoire l'agriculteur peut-il encore imposer à la flore hébergée dans une parcelle sachant que celle-ci est déjà en partie déterminée par le sol et le climat ?

La mise en place depuis 2002 d'un observatoire de la flore adventice dans le cadre de la surveillance biologique du territoire assurée par le Ministère de l'Agriculture vise précisément à suivre l'évolution de la flore adventice (voir Delos *et al.* (2006) ou Fried *et al.* (2007) pour plus de détails). Le réseau Biovigilance Flore représente près de 1000 parcelles de grandes cultures qui couvrent la France métropolitaine. Ce réseau est visité chaque année par le Service de la Protection des Végétaux. Dans chaque parcelle, la flore est relevée dans une zone témoin non désherbée (qui donne accès à la flore potentielle) et dans le reste de la parcelle soumis à l'ensemble des pratiques. Toutes les interventions des agriculteurs sont enregistrées ainsi que quelques données majeures sur le milieu physique (type de sol, climat) et sur l'environnement de la parcelle (présence de haies, cultures voisines). Sur ce dispositif, c'est la (bio)diversité banale c'est-à-dire celle des espèces les plus fréquentes au sein des principales cultures, qui sert de support à l'analyse. Les grandes tendances à l'échelle de la France ont pu être en partie complétées par une étude plus fine des changements au sein de l'ensemble des communautés adventices à l'échelle de la Côte-d'Or.

L'analyse statistique des parcelles suivies par le réseau Biovigilance Flore montre que les choix de l'agriculteur influent plus la composition et la diversité des flores que les conditions naturelles (sol, climat) même lorsque que l'on considère de larges échelles couvrant l'ensemble de la France où les gradients environnementaux sont importants (Fried *et al.*, 2008). Cette étude souligne le poids prédominant de la culture en place et du précédent cultural. Les principaux facteurs structurant la flore

adventice sont ensuite par ordre d'importance décroissant : le pH du sol, le niveau de précipitation, la texture du sol, la latitude et l'altitude (Figure 2).

**Figure 2.** Facteurs influant sur la composition de la flore adventice (d'après Fried *et al.*, 2008). Code couleur : orange=pratiques culturales, bleu=facteurs climatiques, brun=facteurs pédologiques, vert=paysage, noir=divers.



Cette même étude montre aussi que la flore est plus riche et les densités plus importantes dans les zones de moyenne montagne (450 m), sur des sols pauvres de natures filtrantes (sols sablonneux en particulier). Ces zones correspondent aussi à un paysage de type bocager (avec des parcelles cultivées de petites tailles entourées de haies et de prairies permanentes) et une agriculture de type polyculture-élevage (précédents prairies temporaires). Des analyses visant plus particulièrement à comprendre l'influence de la complexité du paysage (diversité de l'occupation du sol : forêt, prairie, éléments linéaires) sur la diversité floristique dans les champs cultivés ont obtenu des résultats similaires en Allemagne (Gabriel *et al.*, 2005). Pour ces études, il resterait toutefois à distinguer l'effet direct du paysage (zone de refuge, corridor assurant une meilleure dispersion par les animaux) de l'effet indirect d'une agriculture généralement plus extensive associée à ces paysages. De telles connaissances seraient autant de leviers potentiels pour entretenir la (bio)diversité sans bouleverser pour autant les modalités de production.

L'influence des différentes techniques culturales peut être mesurée plus précisément en se plaçant dans une culture donnée. Ainsi, dans les champs de colza, on observe une flore adventice différente entre les parcelles conduites avec un labour conventionnel et celles conduites avec un travail du sol simplifié (sans labour). Ces dernières contiennent significativement plus de brome stérile, de capselle bourse-à-pasteur, de géranium disséqué et de repousses d'orge, qui est généralement le précédent cultural du colza (Fried et Reboud, 2007).

En croisant la fréquence des espèces et leur distribution régionale avec l'ensemble des facteurs potentiellement impliqués dans leur occurrence, on peut hiérarchiser l'influence de ces différents facteurs pour chacune des espèces et leur attacher ainsi une valeur indicatrice. A titre d'illustration, le Tableau 2 trie les espèces adventices rencontrées dans 700 parcelles du réseau Biovigilance Flore selon l'intensité de leur réponse aux caractéristiques du milieu et/ou à des techniques culturales. Utilisée dans l'autre sens, cette analyse montre quel bénéfice potentiel vis-à-vis du contrôle de la flore adventice on peut attendre d'un changement de technique.

**Tableau 2.** Part de la variation de la distribution des espèces expliquée par les pratiques culturales et par le milieu physique (sol, climat).

Espèces répondant surtout aux pratiques	Variations expliquées		Espèces répondant surtout au milieu	Variations expliquées	
	Prat. Cult.	Ecol.		Prat. Cult.	Ecol.
<i>Chenopodium album</i>	28,69	8,83	<i>Rumex obtusifolia</i>	9,86	20,84
<i>Solanum nigrum</i>	25,39	5,94	<i>Galeopsis tetrahit</i>	9,63	19,9
<i>Aphanes arvensis</i>	25,12	7,25	<i>Trifolium pratense</i>	6,09	14,51
<i>Beta vulgaris</i> *	19,74	2,15	<i>Ranunculus repens</i>	6,98	14,96
<i>Veronica hederifolia</i>	24,85	7,86	<i>Erodium cicutarium</i>	3,19	11,11
<i>Triticum spp.</i> *	16,49	1,97	<i>Agrostis stolonifera</i>	11,15	18,12
<i>Viola arvensis</i>	21,66	7,34	<i>Spergula arvensis</i>	4,77	11,69
<i>Echinochloa crus-galli</i>	30,19	16,2	<i>Gnaphalium uliginosum</i>	14,42	21,27
<i>Polygonum persicaria</i>	17,55	3,67	<i>Equisetum arvense</i>	5,86	12,21
<i>Papaver rhoeas</i>	19,95	7,54	<i>Paspalum dilatatum</i>	6,41	12,62
<i>Amaranthus retroflexus</i>	24,96	13,55	<i>Rumex acetosella</i>	7,43	13,58
<i>Cerastium glomeratum</i>	22,57	12,29	<i>Calystegia sepium</i>	14,74	20,73
<i>Geranium dissectum</i>	15,87	5,84	<i>Chenopodium polyspermum</i>	10,18	16,06
<i>Brassica napus</i> *	16,27	6,59	<i>Setaria pumila</i>	12,42	18,28
<i>Hordeum vulgare</i> *	13,69	4,31	<i>Datura stramonium</i>	11,83	17,47

\* repousses de cultures

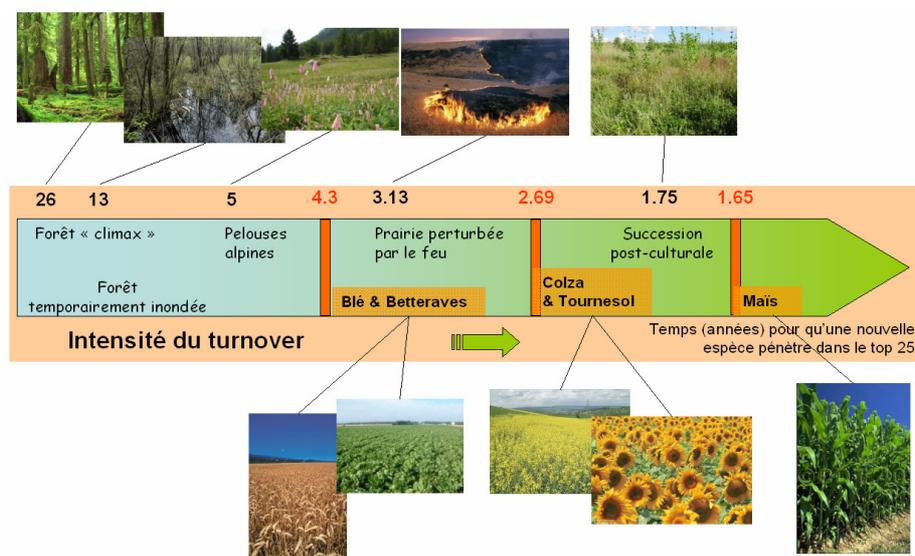
**Légende :** Dans ce tableau à 2 colonnes on classe les espèces qui présentent des coefficients élevés recouvrant la valeur indicatrice (ici exprimée via le pourcentage de variation expliqué par le facteur concerné) soit vis-à-vis des pratiques culturales (Prat. Cult.) colonne de gauche (c'est à dire celles qui sont par exemple sensibles au labour) de celles dans la colonne de droite qui sont indicatrices plutôt de conditions pédoclimatiques (Ecol.). Cette distinction est intéressante car elle permet d'un coup d'œil de mesurer quelle(s) répercussion(s), une modification du système de culture est susceptible d'entraîner sur la flore présente dans la parcelle ; seules les espèces de la liste gauche sont susceptibles de réagir rapidement.

### Qu'est-ce qui a changé en 30 ans ? Quelles pratiques mettre en cause ?

Les changements ont été importants puisqu'ils touchent même des espèces communes dont les fréquences ont parfois varié de plus de 25%. Autrement dit, certaines espèces sont « apparues » ou ont disparu de manière concomitante de plusieurs centaines voire milliers de champs cultivés. La comparaison de la flore de la culture du maïs entre 1973 et 2004 montre une modification de plus de 40% des espèces au sein de la liste des 25 espèces les plus communes (Fried et al., 2005). Les herbicides, et en particulier l'utilisation massive des triazines durant cette période, peuvent expliquer une partie de ces changements car les espèces les plus sensibles sont en net déclin (fumeterre officinale, radis sauvage, galinsogas, etc.) tandis qu'à l'inverse quelques espèces ont été sélectionnées sur leur capacité à tolérer ou à résister à cette famille d'herbicides (panics, liseron des haies, morelle noire, etc.).

La Figure 3 permet de comparer l'intensité des remplacements au sein des flores adventices dans les cinq principales grandes cultures et de les resituer par rapport aux 'turn-overs' d'espèces dans d'autres milieux naturels perturbés ou non par l'homme. On peut constater que le maïs est la culture la plus « instable » avec l'apparition d'une nouvelle espèce tous les 1,65 ans ; ce qui est près de 16 fois plus rapide qu'une succession dans une forêt proche du stade climacique. Les changements n'ont pas été aussi importants dans toutes les cultures et plus une culture est pratiquée depuis longtemps, plus elle a pu entraîner le cortège d'espèces les mieux adaptées réduisant d'autant les possibilités d'entrée de nouvelles venues. Une hypothèse alternative est de considérer que certaines cultures présentent des caractéristiques intrinsèques plus favorables à la pénétration de nouvelles espèces dans la communauté. Ainsi le maïs enregistre certes le turn-over le plus important mais aussi la plus forte proportion d'espèces néophytes. Sur la même période, la betterave et le blé d'hiver qui sont cultivés en France depuis plus longtemps ne connaissent un remplacement que d'une espèce sur six (15%) dans la liste des 25 espèces majeures et un taux plus faible d'espèces néophytes. Il existe donc un contraste assez net entre d'une part des cultures d'hiver ou de printemps déjà « saturées » en espèces natives et avec une faible probabilité de nouveaux apports étrangers et d'autre part des cultures estivales avec un

pool d'espèces natives plus faibles et un fort potentiel d'installation dans un milieu encore relativement vide et peu concurrencé. Dans l'ensemble les changements de flore dans les cultures sont du même ordre d'intensité que ceux de milieux naturels très perturbés par l'homme (sous l'action du feu, par exemple).



**Figure 3.** Intensité du turn-over des 25 espèces les plus communes de différentes communautés perturbées ou non par l'homme. Les chiffres indiquent le temps nécessaire au remplacement d'une espèce parmi les 25 plus fréquentes.

Il est aussi possible de partir de caractéristiques biologiques connues de certaines espèces pour interpréter certaines évolutions de flore. Dans les régions où la monoculture de maïs domine, les espèces estivales strictes (sétaire glauque, datura stramoine, panics) et certaines vivaces (liseron des haies, raisin d'Amérique) ont été très rapidement sélectionnées. La date de semis du maïs et l'irrigation liée à sa conduite ont sélectionné une flore qui répond favorablement à ces techniques culturales. Cela contraste avec les évolutions observées dans les régions de l'Ouest où le maïs est conduit en rotation avec des céréales d'hiver et où par conséquent des espèces ayant une plage de germination plus étendue, compatible à la fois avec les dates de semis du blé et du maïs ont été sélectionnées : ray-grass<sup>6</sup>, stellaire intermédiaire, pâturin annuel, véronique de Perse (Fried *et al.*, 2006).

Certaines espèces peuvent profiter de leur succès dans une culture pour s'étendre à d'autres cultures de la rotation. C'est notamment le cas des géraniums qui 'débordent' du colza où ce genre est difficile à désherber et progressent dans les cultures de blé d'hiver suivantes malgré les possibilités de contrôle offertes par les herbicides disponibles. De manière générale, on pourrait s'attendre à la progression de nombreuses espèces peu sensibles aux herbicides, mais il ne suffit pas pour une espèce d'avoir un unique caractère biologique bien adapté si par d'autres caractères (espèce peu compétitrice, cycle biologique incompatible avec la culture, etc.) celle-ci ne peut passer à travers l'ensemble des autres pressions culturales. Par exemple, l'armoise commune est une espèce pluriannuelle qui ne peut développer des populations abondantes qu'en situation de non-labour. Sa relative tolérance aux

<sup>6</sup> Du fait de la difficulté de distinguer les différentes espèces de ray-grass sur le terrain avec la présence fréquentes d'hybrides entre les trois espèces allogames : *L. multiflorum*, *L. perenne* et *L. rigidum* et de repousses de cultivars sélectionnés par l'homme (Jauzein, 1995), le terme ray-grass renvoie indistinctement dans Biovigilance Flore, aux trois espèces citées.

herbicides utilisés dans le blé n'est donc pas une condition suffisante pour y permettre son développement.

Pour comprendre les changements de composition et de diversité des communautés, il apparaît donc de plus en plus nécessaire de considérer simultanément l'ensemble des caractères biologiques et écologiques de toutes les espèces afin d'identifier celles qui présentent le meilleur panel de caractéristiques pour réussir dans un système de culture donné. C'est ce constat qui nous a amené à nous intéresser à la notion de groupe fonctionnel qui correspond à un ensemble d'espèces partageant à la fois des traits biologiques communs, un comportement écologique similaire et/ou un effet identique sur l'écosystème (Lavorel et Garnier, 2002).

### **Une sélection de groupes fonctionnels reliés aux caractéristiques de chaque culture ? Analyse de l'évolution des groupes fonctionnels dans le tournesol**

Selon les concepts développés par les écologues, on peut considérer que la réussite d'une espèce dans un milieu tient en grande partie à l'adéquation entre ses traits biologiques et les conditions écologiques qui agissent comme des « filtres » empêchant l'établissement de certaines espèces ou conduisant à leur élimination (Keddy, 1992 ; Weiher *et al.*, 1999). Ainsi, les traits peuvent directement mettre en relief les mécanismes impliqués dans la relation entre espèce et environnement. Dans notre approche sur les groupes fonctionnels, une quinzaine de caractéristiques biologiques et écologiques a été pris en compte couvrant notamment la morphologie, la phénologie, les modalités de la reproduction des plantes, la réponse aux herbicides, à la lumière, à l'azote. Le principe a initialement consisté à rechercher quelles caractéristiques discriminent le mieux les espèces en régression de celles en progression pour savoir s'il existe des différences intrinsèques entre espèces qui permettraient d'expliquer les changements. Dans ce travail comparant la flore adventice du tournesol entre 1970 et 2000, cinq caractéristiques ont été identifiées comme déterminantes pour le succès des espèces dans le tournesol : la tolérance aux herbicides du tournesol, la réponse à la lumière, la réponse à l'azote, la période de floraison et le port de la plante.

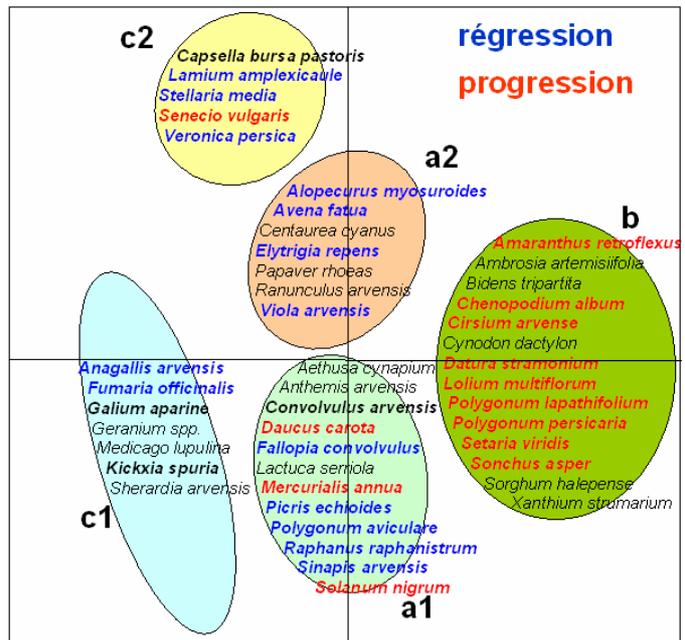
L'analyse révèle que les espèces en progression sont concentrées dans un seul groupe fonctionnel (Figure 4) d'espèces compétitives (grande taille, port érigé, valeurs indicatrices élevés pour l'azote), ayant un cycle assez mimétique de celui du tournesol (germination en fin de printemps, fructification en fin d'été) et adaptées aux conditions écologiques (héliophilie compatible avec des inter-rangs importants, tolérance aux herbicides du tournesol).

Un des avantages de l'approche par les groupes fonctionnels est de pouvoir se risquer à faire des prédictions si les mêmes pressions de sélection perdurent dans les cultures de tournesol. Appliquées au cas du tournesol, ces prédictions font sens dans la mesure où certaines espèces du groupe fonctionnel favorisé sont déjà abondantes localement en France (ambrosie à feuilles d'armoise, lampourde glouteron) ou signalées comme adventices majeures dans les tournesols d'autres pays européens (sorgho d'Alep en Europe de l'Est).

En réponse à l'augmentation des pressions de sélection exercées par les pratiques culturales, il apparaît donc une spécialisation des flores adventices par culture. Dans le colza, l'adaptation aux pratiques de désherbage et à la date de semis très précoce (août) serait la clé de la sélection des espèces adventices tandis que dans le tournesol, s'ajoute à ces deux facteurs l'adaptation à l'environnement créée par la culture (héliophilie, nitrophilie) (Fried *et al.*, 2009). Ces exemples illustrent ce qui pourrait s'avérer une règle très générale : le changement de la composition des communautés adventices suivrait avec un certain décalage dans le temps à la fois les évolutions du milieu et la somme des pressions de sélection subies. On ne doit toutefois pas exclure que les espèces elles-mêmes ne sont pas stables et donc qu'elles évoluent aussi naturellement en réponse aux pressions reçues. Cette étude concentrée sur les changements de flore au sein des espèces les plus communes

ne dit toutefois rien sur la façon dont ont évolué les communautés en terme de nombre d'espèces par parcelle et de densité moyenne des infestations.

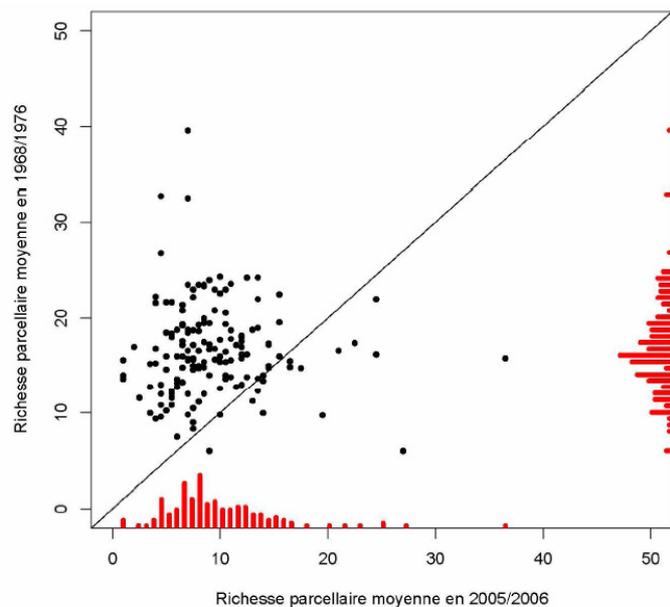
**Figure 4.** Distribution des espèces en progression (rouge), en régression (bleu) ou stable (noir) dans le tournesol entre les cinq groupes fonctionnels identifiés (d'après Fried *et al.*, 2009). L'axe 1 de l'analyse canonique sépare les espèces en fonction de leur taille (de g. à dr., petite à grande), de leur phénologie (hivernale à estivale) et de leur réponse à la lumière (tolérant l'ombre à héliophile). L'axe 2 sépare les espèces d'un point de vue de leur réponse aux conditions écologiques : xéro-thermophiles, acidiphiles ou calcicoles en bas, plus ou moins indifférentes aux conditions du milieu en haut, nitrophiles et thermophiles à droite.



## Mesure de la réduction de la biodiversité floristique des champs cultivés

Une étude menée à l'échelle de la Côte-d'Or a permis, sur un ensemble de 158 parcelles, de comparer les communautés d'adventices à partir de relevés de flores réalisés entre 1968 et 1976 (Dessaint *et al.*, 2001) et de relevés réalisés en 2005 et 2006 (Fried *et al.*, sous presse).

**Figure 5.** Evolution du nombre moyen d'espèces par parcelle entre les deux campagnes 1968/1976 et 2005/2006 effectuées en Côte d'Or (d'après Dessaint *et al.*, 2007). Chaque point représente une des 158 parcelles analysées. Si les points tombent dans triangle supérieur alors la parcelle a enregistré une baisse du nombre d'espèces sinon le nombre d'espèces est en hausse. Les projections des points sur les axes (histogrammes) illustrent la répartition des parcelles en fonction du nombre moyen d'espèces en 2005-2006 (axe horizontal en bas) et en 1968-1976 (axe vertical à droite)



A l'échelle de la communauté, on a pu constater une forte chute de la diversité (Figure 5). Le nombre d'espèces adventices rencontrées par parcelle est passé en moyenne de 16.6 à 9.3 soit une baisse de

44%. La baisse du nombre moyen d'individus au m<sup>2</sup> subit une chute encore plus spectaculaire passant de 61,5 à 20,2 soit 67%.

A l'échelle des espèces, cette étude confirme la progression des espèces les plus nitrophiles au détriment des espèces messicoles oligotrophes (nigelle des champs, miroir de Vénus). La modification des rotations avec la régression des céréales de printemps au profit des cultures d'hiver (orge d'hiver, colza) a aussi favorisé les annuelles d'automne, en particulier les plus précoces qui ont des levées synchronisées avec les semis des colzas en août (laitue scarole, peigne de Vénus) au détriment des annuelles printanières (renouée liseron, linaira bâtarde). Le poids des herbicides du colza (notamment de la trifluraline) est aussi très perceptible avec la progression des géraniums, du sisymbre officinal, de l'anthriscus commun, etc. Les changements constants de pratiques qui font de l'agrosystème un milieu encore largement imprévisible ont favorisé les espèces les plus généralistes - c'est-à-dire celles capables de profiter de situations très variées (progression du séneçon vulgaire, maintien de la capselle bourse-à-pasteur, du pissenlit, etc.) – au détriment des espèces spécialisées d'efficacité maximale dans une situation donnée mais incapables de réussir dans toute autre situation rencontrée au cours de la rotation.

A l'échelle des groupes fonctionnels, on constate une régression plus marquée des espèces à pollinisation entomogame<sup>7</sup> tandis que les autogames<sup>8</sup> et les anémogames<sup>9</sup> restent plus stables (Fried, 2007). Bien que les causes de régression soient multiples et complexes, cette observation est probablement à rapprocher du déclin des populations d'insectes pollinisateurs en zone de grandes cultures. Il n'est cependant pas facile de distinguer les causes des conséquences : est-ce le départ des insectes pollinisateurs des champs qui donne un avantage aux espèces végétales autogames et anémogames par rapport aux espèces entomogames ou est-ce la régression de ces espèces produisant pollen et nectar en quantité qui a conduit les insectes à délaisser les parcelles ?

Ainsi, si on ne peut reprocher aux agriculteurs d'avoir bien fait leur travail, l'érosion constatée de la diversité dont une part des fonctionnalités se traduit vraisemblablement par des répercussions sur d'autres guildes de l'agro-écosystème tend à montrer de manière assez claire la non-durabilité des systèmes agricoles intensifs mis en place au cours des dernières décennies. Il n'est pas évident de savoir si l'introduction de zones visant spécifiquement à favoriser la biodiversité est à même de restaurer un équilibre global du système, ni même si la généralisation de pratiques plus modérées peut permettre une telle restauration.

## Conclusion

Une part importante des changements de composition de la flore adventice au cours des trente dernières années a pu être attribuée aux pratiques culturales réalisées par les agriculteurs. Parmi les principaux facteurs identifiés, on trouve i) la place prépondérante de certaines cultures dans les rotations et ii) l'augmentation des apports azotés.

Dans le premier cas, la progression de certaines cultures à l'échelle nationale (colza, tournesol, maïs) a contribué à modifier les pressions de sélection exercées (principalement à travers le choix des herbicides et les dates de semis). Face à ces changements profonds, deux stratégies sont apparues propices à certaines espèces adventices. D'une part, on observe la progression d'espèces spécialisées à une culture. Les spécialistes du colza forment ainsi les rares espèces stables ou en progression dans un contexte de régression généralisée à l'échelle de la Côte-d'Or (rotations principalement de type colza-blé-orge). D'autre part, les espèces les plus généralistes et opportunistes semblent également

---

<sup>7</sup> Pollinisé via les transports de pollen effectués par les insectes venant visiter les fleurs

<sup>8</sup> Capable de s'autoféconder, le pollen produit par la fleur fécondant ses propres ovules

<sup>9</sup> Pollinisé via l'action du vent transportant le pollen entre fleurs

avoir tiré profit du processus d'intensification de l'agriculture. Leur amplitude écologique élargie leur a vraisemblablement permis de mieux faire face à des modifications importantes. La disparition plus rapide des espèces spécialistes par rapport aux espèces généralistes mise en évidence pour les adventices des cultures est un phénomène également documenté pour de nombreux taxons dans différents écosystèmes : oiseaux (Julliard *et al.*, 2006), papillons (Kitahara et Fujii, 2005), etc.

Dans le second cas de l'augmentation d'usage d'engrais azotés, un des effets majeurs détectés est la disparition marquée des espèces caractéristiques des milieux pauvres (espèces oligotrophes) au profit d'espèces nitrophiles compétitives adaptées à des milieux plus riches en ressources. Ainsi, à l'instar de nombreuses autres communautés végétales, prairiales (Aerts *et al.*, 2003) ou forestières (Thimonier *et al.*, 1994), la flore adventice a fortement répondu à l'eutrophisation.

Enfin, le processus le plus surprenant est le déclin massif de la diversité spécifique et fonctionnelle, touchant même les espèces les plus communes, ici observée à l'échelle de la Côte-d'Or en particulier dans les cultures d'hiver (céréales d'hiver, colza). Paradoxalement, certaines adventices continuent de poser de sérieux problèmes agronomiques comme les graminées résistantes aux herbicides (vulpin des champs, ray-grass) ou comme des espèces envahissantes mal contrôlées par le désherbage chimique (ambrosie à feuilles d'armoise, souchet comestible).

La réduction des impacts environnementaux liés à l'agriculture se traduit par un ensemble de mesures qui touche à la gestion des communautés adventices. Le retrait massif de molécules herbicides, l'obligation de mettre en place des rotations, l'interdiction de pratiques de complément telle que l'écobuage ou l'installation dans l'espace agricole de bandes enherbées vont très vraisemblablement influencer la composition des communautés de mauvaises herbes avec des effets qui sont encore mal identifiés et quantifiés. Chez les agriculteurs, la très forte tendance à limiter le travail du sol, à la fois pour des raisons environnementales et économiques, risque d'amplifier les éventuels problèmes liés aux autres mesures pré-citées. Cela justifie pleinement l'intérêt d'un suivi de la flore adventice tel que réalisé par le réseau Biovigilance Flore, tant pour une évaluation quantifiée de la biodiversité des communautés adventices que pour l'analyse des risques phytosanitaires qui en découlent.

**Remerciements :** *les auteurs tiennent à remercier les agents de la Protection des Végétaux et des FREDON réalisant les relevés de flore sur le dispositif Biovigilance, les agriculteurs qui participent à ce réseau, Gilbert Barralis pour avoir mené les premiers inventaires de la flore adventice durant les années 1970 ainsi que Sabrina Gaba, Sandrine Petit (UMR BGA) et Christian Huyghe pour la relecture de l'article. Ce travail a bénéficié des supports financiers du Ministère de l'Agriculture, de l'ANR (en particulier programme Vigiweed) et de l'INRA.*

## Références bibliographiques

Aerts R., de Caluwe H., Beltman B., 2003. Is the relation between nutrient supply and biodiversity codetermined by the type of nutrient limitation? *Oikos* 101, 489-498.

Aymonin G.G., 1962. Les messicoles vont-elles disparaître ? *Science et Nature* 49, 3-9.

Aymonin G.G., 1976. La baisse de la diversité spécifique dans la flore des terres cultivées. *Ve Colloque International sur l'Ecologie et la Biologie des Mauvaises Herbes*. p 195-202.

Barralis G., Chadoeuf R., 1980. Etude de la dynamique d'une communauté adventice. I. Evolution de la flore adventice au cours du cycle végétatif d'une culture. *Weed Research* 20, 231-237.

Delos M., Hervieu F., Folcher L., Micoud A., Eychenne N., 2006. La «Biovigilance», des OGM au général. Exemple du suivi des grandes cultures en France. *Phytoma-LDV* 589, 44-48.

Dessaint F., Chadoeuf R., Barralis G., 2001. Diversité des communautés de mauvaises herbes des cultures annuelles de Côte d'Or (France). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 5, 91-98.

- Fried G., 2007. Variations spatiale et temporelle des communautés adventices des cultures annuelles en France. Thèse de doctorat. INRA-Université de Bourgogne, Dijon, France, 357 p.
- Fried G., Bombarde M., Delos M., Gasquez J., Reboud X., 2005. Les mauvaises herbes du maïs : ce qui a changé en 30 ans. *Phytoma-LDV* 586, 47-51.
- Fried G., Chauvel B., Reboud X., 2009. A functional analysis of large-scale temporal shifts from 1970 to 2000 in weed assemblages of sunflower crops in France. *Journal of Vegetation Science*. doi: 10.3170/2008-8-18465.
- Fried G., Norton L.R., Reboud X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128, 68-76.
- Fried G., Petit S., Dessaint, F. Reboud X., Arable weed decline in Northern France: crop edges as refugia for weed conservation? *Biological Conservation*, in press.
- Fried G., Reboud X., 2007. Evolution de la composition des communautés adventices des cultures de colza sous l'influence des systèmes de cultures. *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 14, 130-138.
- Fried G., Reboud X., Bibard V., Bombarde M., Delos M., 2006. Mauvaises herbes du maïs. 25 ans d'évolution dans les grandes régions de production. *Perspectives Agricoles* 320 : 68-74.
- Fried G., Reboud X., Gasquez, J., Délos, M., 2007. Réseau Biovigilance Flore en grandes cultures. *Phytoma-LDV* 610, 10-16.
- Gabriel D., Thies C., Tschardt T., 2005. Local diversity of arable weeds increases with landscape complexity. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* 7, 85-93.
- Gasquez J., 1984. Approche génétique des mauvaises herbes : variabilité infraspécifique évolution - résistances. *Schweizerische Landwirtschaftliche Forschung* 23, 77-88
- Jauzein P., 1995. Flore des champs cultivés. Ed. SOPRA, / INRA, 898 p.
- Jauzein P., 2001. Biodiversité des champs cultivés : l'enrichissement spécifique. *Le courrier de l'Environnement. Dossier de l'environnement de l'INRA* 21, 43-64.
- Julliard R., Clavel J., Devictor V., Jiguet F., Couvet. D., 2006. Spatial segregation of specialists and generalists in bird communities. *Ecology Letters* 9, 1237-1244.
- Keddy P.A., 1992. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. *Journal of Vegetation Science* 3, 157-164.
- Kitahara M., Fujii K., 2005. Analysis and understanding of butterfly community composition based on multivariate approaches and the concept of generalist/specialist strategies. *Entomological Science* 8,137-149.
- Lavorel S., Garnier E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* 16, 545-556.
- Marty J.R., Perny R.A., Hilaire A., Rellier J.P., 1980. Evolution de la flore adventice des cultures d'été, irriguées ou non, appartenant à différentes rotations culturales. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 63, 746-756.
- Meerts P., 1997 La régression des plantes messicoles en Belgique. In : Dalmás J.P. (Ed.). Faut-il sauver les mauvaises herbes ? Actes du Colloque de Gap, 9-12 juin 1993. Conservatoire botanique national de Gap-Charance, p 49-56.
- Montégut J., 1997. Evolution et régression des messicoles. In : Dalmás J.P. (Ed.). Faut-il sauver les mauvaises herbes ? Actes du Colloque de Gap, 9-12 juin 1993. Conservatoire botanique national de Gap-Charance, p 11-32.
- Roberts H.A., 1968. The changing population of viable weed seeds in an arable soil. *Weed Research* 8, 253-256.
- Thimonier A., Dupouey J.L., Bost F., Becker M., 1994. Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in northeast France. *New Phytologist* 126, 533-539.
- Weiher E., van der Werf A., Thompson K., Roderick M., Garnier E., Eriksson O., 1999. Challenging Theophrastus: A common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of Vegetation Science* 10, 609-620.

## **Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l'itinéraire technique ?**

**M. Valantin-Morison, L. Guichard, M.H. Jeuffroy**

UMR INRA Agroparistech d'Agronomie – Batiment EGER, BP 01 78 850 Thiverval Grignon

Correspondance : [muriel.morison@grignon.inra.fr](mailto:muriel.morison@grignon.inra.fr)

### **Résumé**

La dépendance aux herbicides des systèmes de culture à base de grandes cultures est avérée et a des conséquences environnementales et agronomiques lourdes pour l'agriculteur et la société. L'objectif de cet article est de montrer que des processus tels que la compétitivité de la culture, l'interruption du cycle des mauvaises herbes de manière mécanique ou biologique peuvent être mobilisés pour maîtriser les mauvaises herbes. Afin de favoriser la compétition de la culture vis-à-vis des mauvaises herbes, plusieurs moyens agronomiques peuvent être utilisés séparément ou de manière associée : favoriser les variétés, les espèces étouffantes, mettre en place des associations d'espèces, associer des modifications de date de semis et de date de fertilisation azotée. Afin de perturber le cycle de vie des adventices, on peut mobiliser les effets des travaux du sol avant semis, le désherbage mécanique. La culture de précédents allélopathiques fait l'objet de travaux récents en agronomie et pourrait constituer un moyen innovant de maîtriser la croissance des adventices de la culture suivante. Enfin, nous discutons les conséquences de ces solutions agronomiques sur d'autres bioagresseurs, sur d'autres pratiques ou sur l'évaluation globale de la durabilité de tels itinéraires techniques.

### **Abstract**

Dependency of cereals crops on herbicides is well known. Concerns about the adverse impacts of herbicides and more largely of pesticides on the environment and their inevitable negative side-effects on non-target organisms have been growing since the 1960's. The objective of this paper is to demonstrate that competitiveness of the crop and weed cycle disturbance can be used to manage weed invasion without herbicides. In order to enhance competitiveness of the crop towards weeds, several crop practices can be combined: choosing species and cultivars, which are known to have smothering effect on weeds, mixing crops (cereals and grain legumes), changing date of sowing and date of nitrogen fertilization. In order to break the weed cycle, in order to reduce or even avoid weed seeds production, relevant choice of soil tillage before sowing, mechanical weeding or relevant period of grassland cutting could be associated with the other solutions quoted before. Moreover, allelopathy properties of some crops have been recently studied and could constitute a key element in the reduction of weed emergence or weed growth in the successive crop. Finally, we discuss the consequences of those crop managements either on disease/pests and on the sustainability of such solutions.

---

### **I Les enjeux**

Les mauvaises herbes, appelées aussi adventices, sont souvent citées comme un des problèmes majeurs que l'on se place en système de grandes cultures conventionnelle ou biologique. Ces mauvaises herbes sont, en agriculture conventionnelle, gérées de manière préventive par des moyens agronomiques mis en place dans le système de culture mais surtout de manière curative ou préventive par l'utilisation d'herbicides chimiques. La complémentarité des molécules chimiques actives employées

et des méthodes de lutte culturales dans une rotation assure un maintien durable d'un stock semencier faible. Néanmoins, l'application d'un herbicide est un acte technique rapide, relativement peu coûteux, et d'une très bonne efficacité. L'efficacité recherchée lors de l'application d'un herbicide est généralement supérieure à 95 % de mortalité des espèces visées, et bien souvent proche de 100 %. Par ailleurs, les mauvaises herbes sont présentes sur toutes les parcelles cultivées. La technique est donc très largement utilisée et est devenue bien souvent l'unique moyen de lutte contre les infestations. Rares, malgré quelques exemples récents issus de l'agriculture biologique, sont les cultures pour lesquelles le désherbage mécanique est employé. L'usage intense des herbicides et leurs efficacités ont permis aux systèmes de culture d'être considérablement simplifiés, homogénéisés, tant sur le plan de la diversité des rotations des cultures que sur le plan du travail du sol. Si l'on regarde les pratiques agricoles de protection phytosanitaire appliquées actuellement aux grandes cultures au travers des données SCEES, on note que l'IFT (indice de fréquence de traitement) moyen de la sole occupée par de 9 grandes cultures est de 3.9 et que les herbicides occupent 40 % du total d'IFT moyen toutes cultures confondues. Toutes les cultures ne « contribuent » pas à la même hauteur à la pression phytosanitaire : 75 % de l'utilisation des produits phytosanitaires (toutes catégories confondues) est le fait des céréales à paille (blé tendre et orge) et du colza, qui totalisent 70% de la surface (Ecophyto R&D, 2008). Néanmoins, l'ensemble des cultures présente le même niveau d'IFT moyen sur les herbicides, démontrant bien que la maîtrise de l'enherbement reste un facteur sanitaire problématique pour tous les types de culture et que sa gestion s'effectue à l'échelle pluriannuelle de la succession.

Les conséquences de cette utilisation intense d'herbicide sont doubles : une spécialisation de la flore et la contamination du milieu par les résidus de ces matières actives. La flore adventice évolue sous l'effet des pratiques vers une flore souvent qualifiée de 'difficile', soit parce que peu de solutions herbicides efficaces existent sur les espèces sélectionnées par le système (c'est le cas par exemple des bromes dans les systèmes céréaliers sans labour), soit parce que des biotypes résistants apparaissent et se développent (Chauvel *et al.*, 2001a). En outre, le bilan environnemental de cette forte dépendance aux herbicides n'est pas brillant : Les données de contamination des eaux superficielles et souterraines de l'Ifen, bien qu'hétérogènes et non représentatives sur tout le territoire font état d'une contamination quasi généralisée des eaux de surface et souterraines par les pesticides avec une prépondérance des herbicides (source IFEN). La pression sociétale sur ce sujet se traduit par des changements de réglementation, des interdictions des matières actives considérées comme les plus polluantes. En outre, les coûts d'homologation de nouvelles molécules sont tels que peu de nouvelles solutions chimiques verront le jour. Tous ces éléments de contexte se traduisent pour l'agriculteur, par une gamme de solutions techniques limitée, et globalement plus chère. Par conséquent, cette dépendance des grandes cultures aux herbicides doit être réduite et pourrait l'être si l'on en croit les travaux existant sur le sujet.

Cet article fait justement le point (i) des processus mobilisés pour maîtriser sans herbicide la flore adventice au cours du cycle annuel des grandes cultures (compétition / destruction mécanique / allélopathie) et (ii) des éléments de l'itinéraire technique qui permettent de déclencher ces processus.

## **II Comment ça marche : les processus, les modes d'action ?**

Pour analyser les effets des adventices sur les performances d'une culture, on distingue la nuisibilité primaire, qui correspond à un effet indésirable de la population d'adventices sur le produit (rendement ou qualité) de la nuisibilité secondaire qui correspond aux dommages que la flore potentielle ou réelle peut avoir sur la capacité de production ultérieure (augmentation du stock semencier par exemple) (Caussanel, 1989). La nuisibilité primaire s'exerce à la fois sur la qualité et la quantité de la récolte. On distingue alors la nuisibilité directe qui correspond à la diminution de production quantitative (rendement), de la nuisibilité indirecte qui correspond aux autres effets indésirables tels que la diminution de la qualité des récoltes (Caussanel, 1989). Ainsi dans cet article, lorsque nous parlons de

maîtrise des adventices sur le cycle annuel des cultures, nous faisons référence surtout à la réduction des effets directs des mauvaises herbes, c'est à dire la nuisibilité directe.

Nous évoquerons dans cette partie en quoi consistent les objectifs généraux que l'on peut avoir pour un itinéraire technique sans herbicide : favoriser la compétition de la culture semée mais aussi au sens plus large perturber le cycle de vie de l'adventice : la levée, la croissance et la reproduction.

### *1-La compétition pour les ressources*

Le premier processus qui vise à gérer le développement et la croissance des adventices dans un couvert cultivé est la compétition. La compétitivité d'une plante sur une autre se traduit par sa capacité à prélever les ressources (lumière, eau, azote) de manière plus efficace que ses concurrentes. Le port, la hauteur, la vitesse de croissance, la durée du cycle sont des facteurs biologiques intrinsèques à l'espèce qui influencent la compétitivité. La compétition d'une culture sur ces concurrentes s'exprime souvent en termes de réduction du nombre et de la biomasse des adventices et parfois en termes de production de semences.

#### **1-1 Compétition pour l'azote et autres éléments minéraux**

Cette forme de d'interaction vise à favoriser la préemption et l'utilisation des ressources du milieu par la culture semée. La compétition pour les ressources en faveur de la plante cultivée s'observe lorsque les adventices et le couvert cultivé utilisent des ressources différentes, ou lorsqu'elles les utilisent à des périodes différentes. En outre, la complémentarité entre les espèces peut également provenir d'un métabolisme photosynthétique différent (C3 et C4), d'une différence dans les profondeurs, les directions (latérales ou verticales) et les densités d'enracinements pour la préemption des ressources du sol et d'une différence de période de développement foliaire et d'activité racinaire (Ofori et Stern, 1987). On peut facilement observer cette complémentarité par rapport à l'utilisation de l'azote, avec une association entre une légumineuse (qui a la capacité de fixer le nitrogène présent dans l'atmosphère) et une céréale par exemple. Si cette compétition pour l'azote est en faveur de la culture, elle se traduit par une croissance, soit une surface foliaire ou une biomasse, plus forte et plus rapide. Il en résulte une meilleure interception de la lumière par la plante cultivée.

A l'inverse, la compétition entre la culture et les adventices est souvent maximale lorsqu'elles partagent les mêmes ressources en même temps. C'est souvent le cas de plantes de la même espèce et dont l'architecture est très proche (blé et vulpin / colza et moutarde sauvage / betterave et chénopode). Ces adventices sont souvent considérées comme problématiques par l'exploitant car (i) leur nuisibilité directe et surtout indirecte peuvent être élevées (ii) les herbicides sont souvent inefficaces et les successions culturales simplifiées les favorisent. Par conséquent, le choix pertinent des éléments de l'itinéraire technique peut reposer sur le choix d'un objectif qui vise à favoriser la compétition de la culture sur ces espèces adventices problématiques.

#### **1-2 Compétition pour la lumière**

La compétition pour la lumière est permise par une augmentation de la surface foliaire et de la biomasse de la culture, ce qui se traduit par une meilleure interception de la lumière. La compétition pour la lumière peut aussi être favorisée par une complémentarité de l'architecture de deux ou plusieurs plantes cultivées en mélange. On peut la mesurer par la quantité de rayonnement sous le couvert ou la quantité de rayonnement intercepté par les différentes couches du peuplement cultivé. Cette compétition entraîne un effet d'ombrage sur les adventices, dont la croissance est très perturbée : elles s'étiolent, elles meurent, elles produisent moins de graines même si elles achèvent leur cycle de développement (Dejoux *et al.*, 1999). Parfois même, la diversité des adventices est très réduite.

## 2- Perturber la croissance et le développement des mauvaises herbes

### **2-1 Perturber la levée des mauvaises herbes**

L'objectif ici est d'empêcher les plantes de lever en perturbant leur milieu et leur environnement. Cela peut se traduire par (i) empêcher l'émergence de la plantule du sol par un enfouissement profond des graines ou une destruction de la graine germée, (ii) priver de lumière par un enfouissement les mauvaises herbes photosensibles, (iii) décaler leurs périodes de dormance par rapport à la culture annuelle semée. Cet objectif générique peut être atteint de différentes manières : mécaniquement par le labour ou/et des « faux semis » ou « biologiquement » par des décalages de semis. Mais l'ensemble de ces mesures agronomiques dites prophylactiques ont des effets partiels qu'il convient de combiner avec d'autres moyens culturaux. Peu d'exemples seront développés dans la partie II de cet article car ils sont largement synthétisés dans Munier Jolain *et al.*, (2005) et également repris ici dans ce même recueil par Munier Jolain *et al.*

### **2-2 Perturber mécaniquement leur croissance et leur reproduction**

L'objectif ici est d'empêcher les plantes d'avoir une croissance optimale et de fabriquer des graines, sans pour autant réduire la croissance de la plante cultivée. Cela se traduit la plupart du temps par une destruction de la plante adventice au cours de son cycle. Cette destruction est permise soit par la fauche lors de la récolte ou la fauche d'inter-culture ou de prairies, soit par le hersage, le binage dans des cultures annuelles avant récolte.

### **2-3 Perturber biologiquement leur croissance**

La perturbation biologique de la croissance des plantes adventices peut être obtenue (i) via la compétition pour les ressources, en particulier la lumière, comme décrit précédemment, ce qui entraîne un étiolement et une forte réduction de la production de semences ou (ii) via l'allélopathie.

L'allélopathie est définie par Rice (1984) comme « tout effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante sur une autre à travers la production de composés chimiques libérés dans l'environnement ». Bien qu'ayant souffert pendant longtemps de « speculation, faulty experimentation, and unreasonable conclusions » (Olofsdotter *et al.*, 2001) l'allélopathie est permise par des mécanismes dont la réalité est avérée. La libération de médiateurs chimiques peut avoir lieu alors que la plante productrice est vivante (allélopathie directe, par exemple par exudation racinaire) ou au moment de la dégradation des résidus de la plante productrice, après la mort de celle-ci (allélopathie indirecte). Ces médiateurs chimiques sont principalement des métabolites secondaires (terpènes, alcaloïdes, molécules aromatiques...). Parmi les grandes familles identifiées, les composés phénoliques jouent un rôle essentiel (Inderjit *et al.*, 1996). Les mécanismes d'action des molécules phytotoxiques sur les plantes cibles sont encore peu étudiées : seuls des travaux sur les voies métaboliques affectées sont recensés (Doré *et al.*, 2004).

Une valorisation en grande culture de propriétés allélopathiques de couverts végétaux consiste à planter un couvert végétal à potentiel allélopathique plusieurs mois avant le semis d'une culture (Doré *et al.*, 2004 ; Delabays et Munier Jolain, 2004) La destruction de ce couvert et l'incorporation des résidus aux couches de sol superficielles juste avant le semis de la culture doit alors avoir l'objectif d'inhiber la croissance des adventices. Des expérimentations conduites au champ ont ainsi montré l'effet inhibiteur très fort de certains couverts végétaux implantés en interculture, comme l'avoine, sur la croissance des adventices dans la culture suivante.

### III Quels éléments de l'itinéraire technique mettre en œuvre pour mobiliser ses processus : Illustrations et conditions de réussite

Les processus explicités dans la partie précédente constituent des objectifs que l'on peut assigner aux itinéraires techniques avec peu ou sans herbicides. Mais, chaque objectif peut être atteint par différents moyens. C'est l'ensemble combiné et logique de ces solutions agronomiques à effets partiels qui permettra d'atteindre l'objectif. Cela peut se résumer sous la forme d'un schéma conceptuel de fonctionnement des interactions couvert cultivé – adventices (Figure 1).

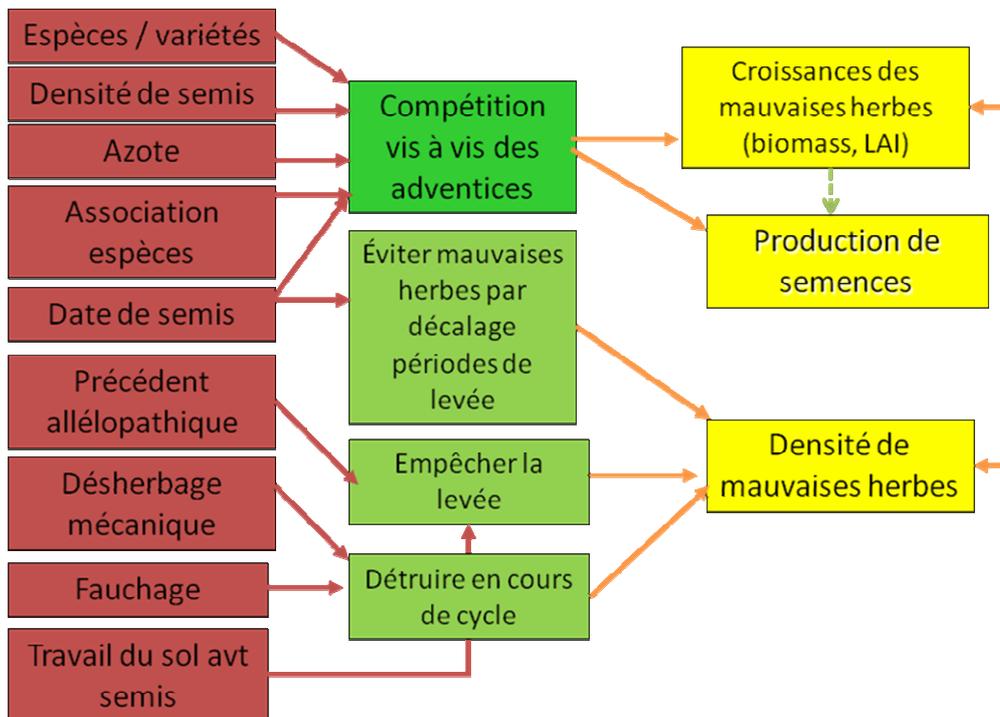


Figure 1 : Schéma de fonctionnement des interactions pratiques / couvert cultivé et mauvaises herbes

#### 1- Les compétitions

Afin d'atteindre dans l'itinéraire technique l'objectif d'accentuer la compétition pour l'eau, l'azote et la lumière de la culture d'intérêt, plusieurs solutions agronomiques peuvent être mises en place séparément ou de manière associée (Figure 1).

##### 1-1 L'effet des espèces

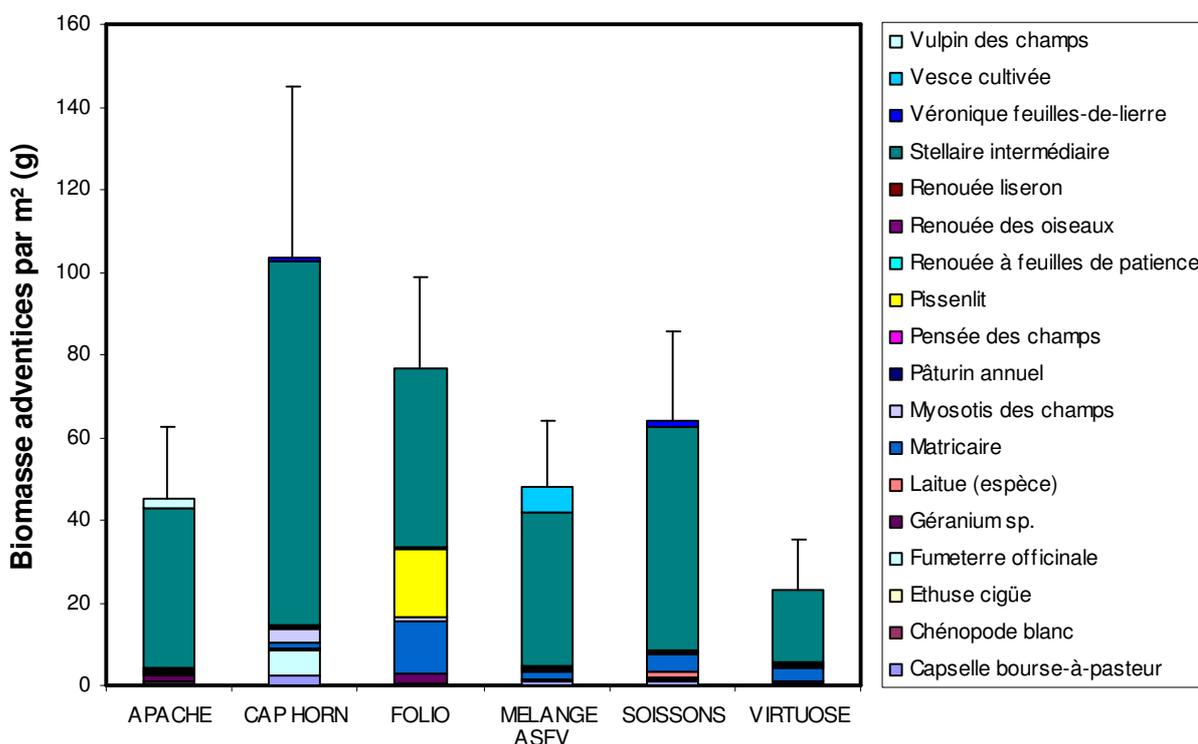
Il existe des espèces plus ou moins « étouffantes » qui peuvent être exploitées dans la rotation. Elles sont souvent caractérisées par une fermeture rapide du couvert, liée à une croissance rapide, un port étalé ou haut qui monte vite, une aptitude à ramifier importante, de larges feuilles. On dit souvent des prairies de graminées et/ou de luzerne, du trèfle, du colza, de la moutarde, des associations céréales légumineuses que ce sont des cultures étouffantes (Fiche stephy du Corpen reprise de Gran-Aymerich, 2006). Elles peuvent être utilisées comme des cultures annuelles de rente ou des inter-cultures ou en culture pluriannuelle. Par exemple, la compétitivité du colza sur les adventices repose sur des caractéristiques telles qu'un port étalé en rosette, puis une montaison et une ramification rapide, un pivot à croissance rapide, une vitesse d'absorption de l'azote élevée et la production de biomasse massive et rapide qui en résulte. Ces caractéristiques de peuplement sont essentiellement influencées par la disponibilité en eau et en azote du sol et par la température, comme cela sera décrit plus loin. Sur les prairies temporaires de Ray-grass/dactyle/fétuque Médienne et Charrier (2008) montrent clairement

que seulement en un an l'abondance, la richesse et la diversité des communautés d'adventices sont réduites. Les adventices pérennes sont de plus en plus favorisées. Meiss *et al.* (2007) confirment que ces modifications rapides de communautés d'adventices annuelles autant sur prairies de dactyle que de luzerne sont liées à des mécanismes de compétition pour la lumière.

## 1-2 Effet des variétés

Il existe des variétés plus ou moins compétitives : comment se caractérisent-elles ?

Sur blé, Lecomte *et al.* (2000) ont mis en évidence les différences de sensibilité à la concurrence de variété de blé vis-à-vis d'infestation de ray-grass (*Lolium perenne*). Une part de ces différences est expliquée par des différences de précocité de montaison. D'autres critères sont proposés pour expliquer ces différences, comme le port planophile des feuilles, l'aptitude au tallage, la vigueur des plantes dans les phases précoces du cycle, critères qui ne sont pas encore fréquemment renseignés dans les catalogues variétaux. Les variétés hautes sont également plus concurrentielles, mais sont souvent associées à des risques de verse élevés. Elles peuvent cependant être envisagées dans le cadre d'itinéraires techniques à faible niveau de fertilisation azotée, facteur important de gestion du risque de verse. La Figure 2 montre les très nettes différences de comportements variétales du blé sur les adventices, dont la stellaire, adventice majoritaire dans cet essai. On observe que sous les couverts de Virtuose et Apache la biomasse des adventices est significativement réduite. On observe aussi que le mélange variétal permet également d'étouffer les adventices.



**Figure 2** : Biomasse d'adventices par espèces sous différents couverts de variétés de blé. Biomasse mesurée au printemps sur une expérimentation réalisée à Dijon. D'après Munier Jolain, 2006.

Sur colza, peu d'études recensent les différences variétales en matière de capacité concurrentielles. Néanmoins, on parle souvent des variétés hybrides comme étant des variétés au démarrage plus

rapide et à la vigueur végétative plus soutenue (Cetiom, Com perso). En outre ces variétés sont reconnues pour leurs capacités de ramifications très élevées. Une étude récente anglaise (Sim *et al.*, 2007a) a justement mis en évidence des différences marquées et a quantifié les éléments distinctifs des variétés entre elles. Les variétés de colza hautes ou celles avec un couvert végétatif automnale vigoureux sont celles où les deux adventices testées, le ray-grass (*Lolium spp*) et le vulpin (*Alopecurus myosuroides*) présentaient la croissance la plus faible en terme de biomasse, nombre d'épis ou de hauteur. Ces deux variétés se caractérisaient, à même densité, par un couvert dont le LAI, la biomasse étaient les plus élevées et par une part d'interception du PAR de la couche superficielle fleurie était également maximum.

### **1-3 Effet de la densité de semis**

La compétition pour les ressources peut être accentuée par des densités de semis des cultures pures (Le Corre et Assémat, 2000), ou des associations plus élevées afin d'explorer le milieu de manière plus complète. Néanmoins, ces semis denses présentent l'inconvénient de favoriser un micro climat favorable aux maladies. Par le biais de l'écartement, des compromis sont possibles. Par exemple, Munier Jolain (2001) a montré qu'à densité équivalente, les cultures implantées de Lupin (*Lupinus albus* L.) avec un faible écartement entre les rangs (12.5 cm contre 24 ou 50), et donc une répartition sur la surface de la parcelle plus homogène, sont plus concurrentielles : la biomasse de l'adventice des Panic de Coq (*Echinochloa crus-galli*) était divisé par deux.

Dans le cas des associations, une densité globale du peuplement plus élevée ainsi qu'une architecture complémentaire entre la céréale et la légumineuse permettent une plus grande interception de la lumière donc une fermeture plus rapide du couvert. Des études menées sur les associations pois/maïs et pois/orge montrent que les associations interceptent une part plus importante de rayonnement photosynthétiquement actif que les cultures pures (Tsubo *et al.*, 2001 ; Tsubo et Walker, 2004 ; Poggio, 2005). Cet effet d'ombrage induit par les associations limite la croissance des mauvaises herbes ainsi que leur diversité (Goldberg et Miller, 1990).

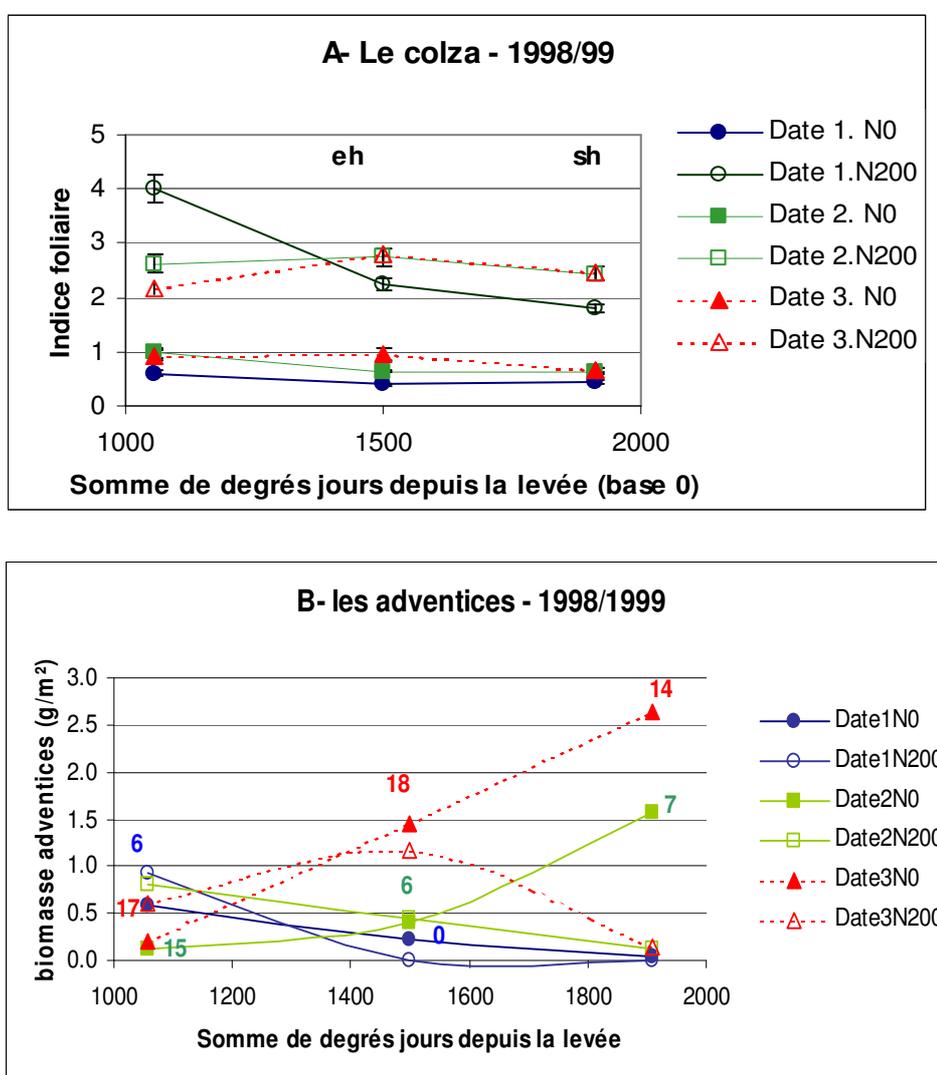
Sur colza, la densité de semis testée en interaction avec différentes dates de semis et dose d'azote au semis n'influence pas la quantité d'azote absorbé en entrée hiver mais favorise des biomasses de colza à des stades précoces plus fortes (Dejoux, 1999). En parcelles agricoles biologiques, Valantin-Morison et Meynard, 2008 (voir aussi Valantin-Morison *et al.*, 2003) montrent par le diagnostic qu'en cas de parcelles fortement enherbées, une densité de plantes de colza trop faible inférieure à 30 pieds/m<sup>2</sup> conjointement à une faible disponibilité en azote du milieu peut réduire la compétition de cette culture vis-à-vis d'une flore naturelle diversifiée.

### **1-4 L'effet conjoint azote date de semis**

Dans le cas du colza des études anciennes sur flore naturelle ou semée (Ferré *et al.*, 2000) et plus récentes sur le ray-grass et le Vulpin (Sim *et al.*, 2007b) montrent combien l'effet de l'interaction date de semis x azote à l'automne peut influencer la compétitivité de la culture vis-à-vis de certaines adventices. L'avancement du semis d'un mois et la forte disponibilité en azote au semis ont pour conséquence l'installation rapide d'une surface foliaire élevée et d'une forte biomasse du colza (Figure 3-A). L'indice foliaire des semis avancés se maintient supérieur à celui des peuplements semés à date normale jusqu'au début de l'hiver. En revanche, l'absence d'une grande quantité d'azote disponible sur un semis précoce (Date 1-N0) ne permet pas d'atteindre une surface foliaire équivalente à celle obtenue avec un semis à date normale avec le même apport d'azote au semis. Cette interaction forte entre la date de semis et l'azote donne des résultats antagonistes de l'avancement de la date de semis. Le fort développement foliaire des colzas avec forte disponibilité en azote a ainsi provoqué une compétition

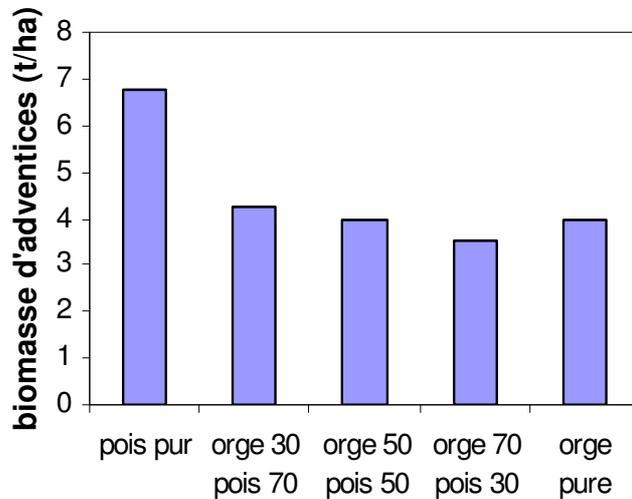
pour la lumière sur les adventices présentes, d'où un étouffement des peuplements d'adventices dont la biomasse et la densité baissent (Figure 3B). En revanche, l'apparition de carences azotées fortes trop tôt avant le début de l'hiver peut mettre en péril cette stratégie d'étouffement. De tels scénarios ont été observés sur des réseaux de parcelles agricoles conventionnelles et biologiques sur des sols superficiels ou des sols ayant reçu des amendements organiques peu riches en azote (Valantin-Morison et Meynard, 2008 ; Valantin Morison et Ferré. 2004).

Dans le cas des associations, la céréale est plus compétitive vis-à-vis de l'azote inorganique du sol, et donc la légumineuse fixe préférentiellement le N<sub>2</sub> atmosphérique (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001). La complémentarité des espèces de l'association a pour conséquence de limiter le nombre de ressources disponibles pour les autres espèces, comme les adventices, et ainsi de capturer une plus grande quantité et une plus large gamme de ressources que les monocultures. Hauggaard-Nielsen *et al.*, (2001) ont montré que les facteurs de croissance des plantes étaient de 25 à 38 % plus efficacement utilisés par les associations (céréales / légumineuses) que par les cultures pures. Il en résulte une meilleure compétition de l'association sur les adventices (Figure 4).



**Figure 3** : Effet de la date de semis et l'azote au semis sur (A) l'indice foliaire du colza et (B) la biomasse des adventices durant l'automne jusqu'en sortie hiver (sh) – Les chiffres en couleur correspondent aux densités moyennes des adventices dont la biomasse est représentée graphiquement. Date 1 = 31 juillet ; Date 2 = 17 août ; Date 3 = 31 août. N0 = aucun apport au semis ; N200 = 200kg apporté au semis. (Pour en savoir plus Ferré et al., 2000).

En outre, la compétition de l'association vis-à-vis de l'azote est également favorisée par une différence de date de semis avec la culture pure.



**Figure 4 :** Biomasse d'adventices mesurée sous des couverts de culture pure ou d'association avec la même densité que les cultures pures mais contenant entre 30 et 70% de pois. Travaux de Corre-Hellou réalisés à Angers dans le cadre d'un projet européen Intercrop : [www.intercrop.dk](http://www.intercrop.dk)

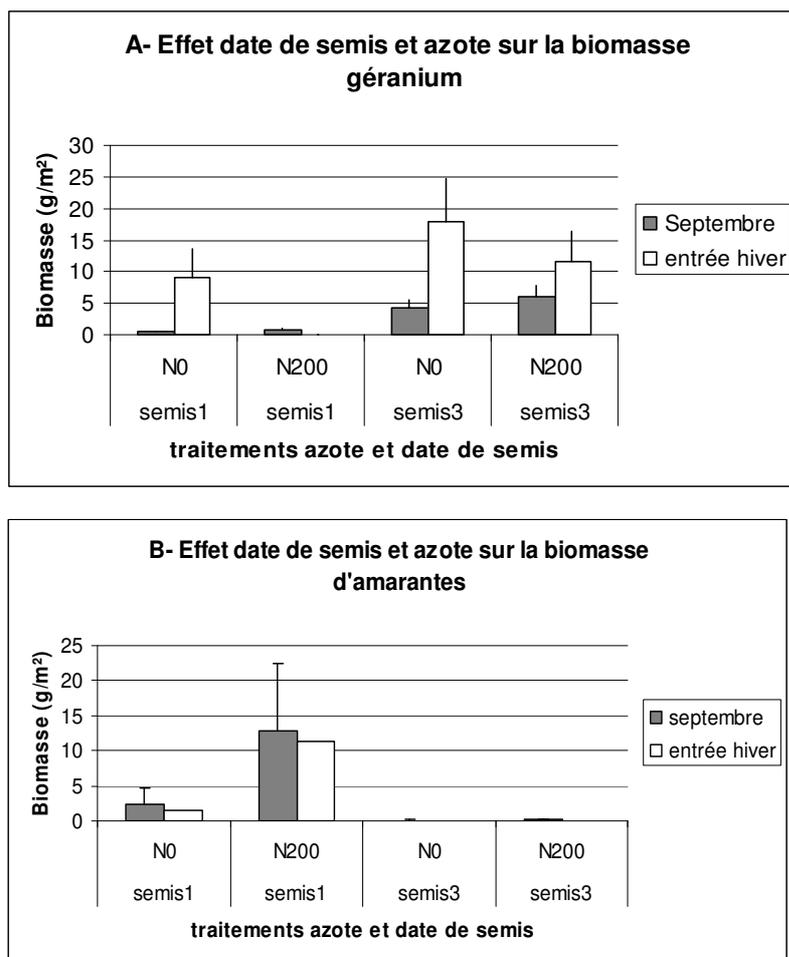
## 2- Perturber la croissance et le développement des mauvaises herbes

### 2-1 Perturber la levée des mauvaises herbes

On peut perturber la levée des adventices soit en les détruisant avant ou juste au moment de la levée soit en réunissant les conditions de milieu *défavorables* à leur levée.

Les techniques qui permettent d'atteindre ces objectifs sont connues de longue date et reprises dans Munier Jolain *et al.* (2005). Ce sont les faux semis, le labour et les décalages de date de semis. Pour un grand nombre d'espèces, à l'exception de la folle avoine, la profondeur maximale d'enfouissement compatible avec la levée est inférieure à 5 cm. En outre, certaines espèces, comme les bromes, présentent une photosensibilité très forte, et ne germent donc pas si elles sont enfouies à quelques centimètres. Le labour permet donc de diviser par 10 la densité de levées de vulpin des champs dans une culture de blé au cours d'une expérimentation menée sur une parcelle très infestée (Chauvel *et al.*, 2001b). Le faux semis est également utilisé et complète l'effet du labour efficacement. Il consiste à préparer un lit de semences assez fin pour faire germer les graines d'adventices, qui seront ensuite détruites juste avant le semis de la culture.

Presque toutes les espèces adventices des champs cultivés présentent des périodes préférentielles de levée marquées, déterminées par la saisonnalité de l'évolution des taux de dormance des semences, et par les gammes de température favorables à la germination. A part quelques exceptions capables de lever toute l'année - pâturin annuel (*Poa annua*), stellaire (*Stellaria media*) -, les espèces qui se développent et se multiplient ne sont pas les mêmes dans les cultures de céréales d'hiver, dans les cultures semées tôt au printemps (orge de printemps, pois de printemps) et dans les cultures semées en avril-mai (tournesol, soja, maïs) (Munier Jolain *et al.*, 2005). Ces exigences biologiques sont parfois assez marquées et peuvent également se percevoir en changeant les dates de semis du blé et du colza d'un mois par exemple. Ainsi, la Figure 5 montre comment, en avançant la date de semis du colza, la croissance et la multiplication d'adventices automnales (géranium) ou estivales (amarante) peuvent être respectivement défavorisées ou favorisées.

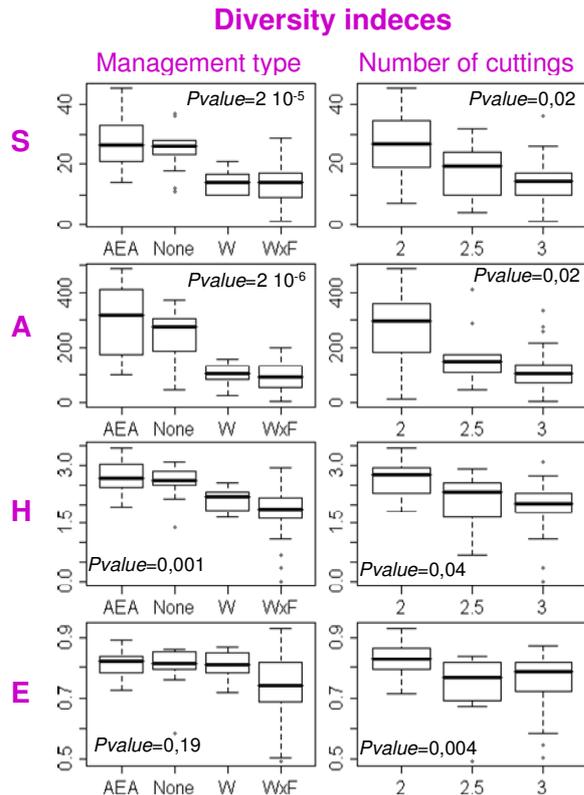


**Figure 5 :** Effet de l'azote au semis et de la date de semis sur la (A) croissance en biomasse des Géraniums et (B) des Amarantes en automne – (Pour en savoir plus voir Dejoux *et al.*, 1999)

## **2-2 Perturber mécaniquement leur croissance et leur reproduction**

Un certain nombre d'actes techniques en cours de cultures peut perturber la croissance et *in fine* la reproduction des adventices. Il s'agit par exemple du fauchage, de la fertilisation de prairies temporaires de graminées ou de luzerne (Mediene, 2008, Meiss *et al.*, 2008). Sur la Figure 6, on observe l'influence majeure du mode de conduite de la prairie temporaire sur l'abondance et la diversité des adventices, notamment le désherbage et le nombre de fauches de luzernière et leurs dates (Médiène, 2008). Meiss *et al.* (2008) détaillent les effets de la fauche sur la croissance, la reprise de végétation de plusieurs adventices annuelles avec ou sans l'effet compétition de la prairie mixte dactyle-luzerne. Les variations de reprise de végétation sont systématiquement liées aux variations de biomasse et de hauteur initiales avant fauche. En outre, les adventices plus âgées sont moins sensibles à la fauche.

Le désherbage mécanique (hersage, binage, houe rotative) sur des cultures annuelles comme le maïs, le colza, le tournesol peut interrompre le cycle de vie des adventices. Ils sont depuis longtemps employés en agriculture biologique en complément d'autres solutions agronomiques. Ces dernières années, un certain nombre d'essais au champ en agriculture conventionnelle ont été suivis sur ces cultures par le Cetiom, ce qui a permis de caractériser la sélectivité et l'efficacité de ces outils mécaniques. Lieven *et al.* (2008) proposent une grille d'utilisation des outils de désherbage mécanique sur colza, maïs, tournesol en fonction de l'outil, du stade de la culture, des adventices et de la texture et de l'humidité du sol (Voir également le guide descriptif de ces outils sur le site du Cetiom).



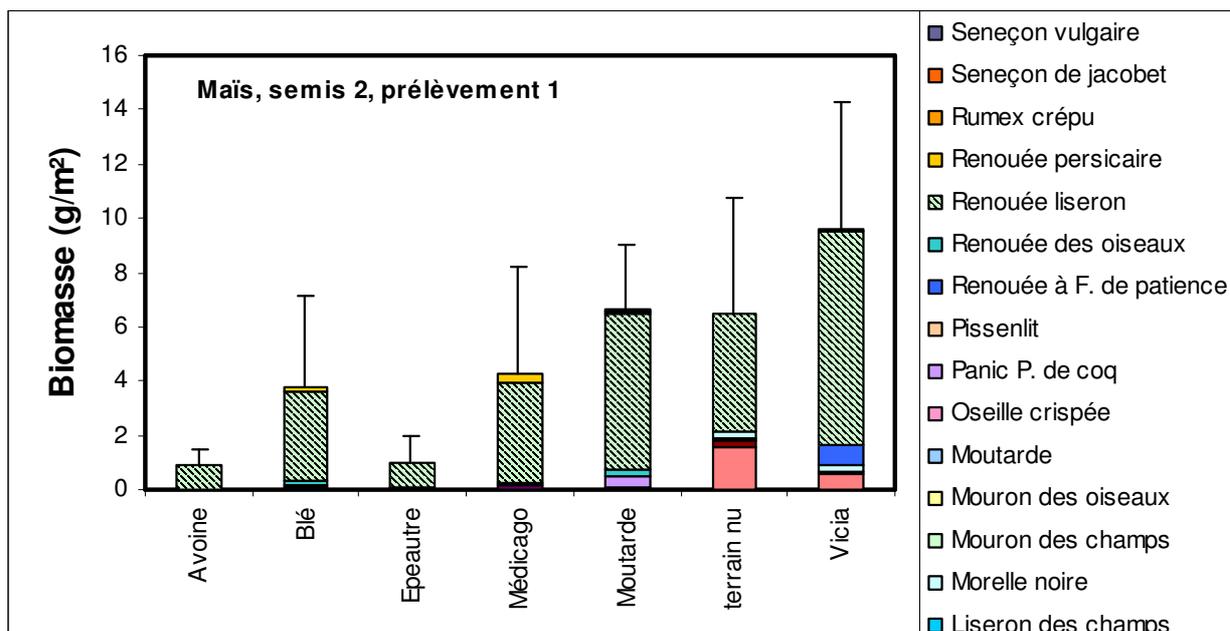
**Figure 6 :** Effet de la conduite de la prairie (Crop management à gauche) et du nombre de fauche annuel moyen (Number of cuttings, à droite) sur la richesse spécifique (S), l'abondance (A), l'indice de diversité de Shannon (H) et l'équitabilité (E) des communautés adventices observées dans des parcelles agricoles en luzerne de la zone de Chizé (plaine sud de Niort). AEA : Agri-Environmental Agreement (parcelles en CAD pour la sauvegarde de l'outarde canepetière, avec une période longue sans intervention agricole); None : aucun traitement; W : chemical weed control (désherbage chimique); WxF : chemical weed control and fertilization (désherbage chimique et fertilisation).

### **2-3 Perturber biologiquement leur croissance et leur reproduction**

De nombreuses études ont permis de mettre en évidence les propriétés allélopathiques de couverts végétaux. Delabays *et al.* (1998) ont par exemple observé, lors d'expérimentations en pots sous serre, que l'adjonction au terreau de culture de 1 % (en poids sec) de résidus végétaux de *Artemisia annua*, de *Bromus tectorum* ou de *Sanguisorba minor*, pouvait inhiber la croissance en biomasse de plantules de mauvaises herbes (amarante et chénopode) de 80 à 90 %. En étudiant les effets inhibiteurs de lignées d'*Artemisia annua* différant uniquement par leur teneur en artémisinine, la même équipe a mis en évidence le rôle de cette molécule dans les effets observés (Delabays et Mermillod, 2001). Ces auteurs soulignent les possibilités de sélection rapide de génotypes à forte teneur en métabolites secondaires à effets allélopathiques potentiels.

Dans la réalité du champ cultivé, il semble bien que les inhibitions de croissance observées au laboratoire soient bien plus difficiles à expliciter. Doré *et al.* (2004) résument les raisons de ces différences entre conditions contrôlées et champ agricole. La première difficulté est liée aux interactions multiples entre deux espèces qui cohabitent ou qui se succèdent : comment distinguer allélopathie et compétition par exemple. La deuxième difficulté tient au fait que, même s'il existe une production de composés dont on a montré en conditions contrôlées l'action dépressive sur les fonctions biologiques d'espèces cibles, cela ne signifie pas pour autant que cet effet s'exprime au champ. Pour cela, il faudrait qu'au moment opportun les quantités disponibles de ces molécules dans le milieu soient suffisantes, et que la plante cible soit dans un état de sensibilité adéquat. Enfin, la troisième difficulté est liée à l'intervention d'autres organismes vivants dans le système : les composés phytotoxiques peuvent aussi avoir des origines microbiennes, indépendantes de la présence d'une culture.

Néanmoins, des expérimentations ont ainsi montré l'effet inhibiteur très fort de certains couverts végétaux implantés en interculture, en particulier de couverts d'avoine et d'épeautre, sur la croissance des adventices dans la culture suivante (Figure 7 – Munier Jolain *et al.*, 2005).



**Figure 7 :** Effet du couvert végétal pendant l'hiver précédant le semis de la culture sur la biomasse des adventices dans le maïs au mois de juillet. Les couverts végétaux ont été semés au mois d'octobre, détruits par broyage et incorporés au sol juste avant le semis du maïs. Les différentes couleurs correspondent aux différentes espèces présentes sur la parcelle d'essai, dominées par la renouée liseron (hachures). Les barres verticales représentent un écart-type.

#### IV Effets induits sur d'autres bioagresseurs ou induits par l'interaction avec d'autres pratiques

##### 1-Effets antagonistes de ces nouvelles pratiques avec d'autres bioagresseurs

Les solutions agronomiques identifiées ci-dessus pour maîtriser la flore adventice ont parfois des effets antagonistes sur d'autres bioagresseurs. Ces effets induits connus sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous.

**Tableau 1 :** Bilan des effets antagonistes sur d'autres bioagresseurs ou sur la croissance de la culture des moyens agronomiques partiels détaillés ci-dessus

Objectif	Moyens	Effets antagonistes			
		Blé	Orge	Colza	autres
Favoriser la compétition de la culture	Décaler les dates de semis	Effet + du Semis précoce sur maladies	Effet + du S précoce sur maladies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet + du Semis précoce sur mouche du chou et supposé sur les pucerons</li> <li>• Attention aux espèces adventices estivales</li> </ul>	Effet + sur insectes du sol des cultures de printemps
	Augmenter la densité de semis	Effet + sur les maladies	Effet + sur les maladies	Effet + sur les maladies comme sclerotinia	
	Apporter de l'azote	Effet + sur les maladies	Effet + sur les maladies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet + supposé sur le sclerotinia</li> <li>• Attention aux espèces adventices nitrophiles</li> </ul>	

				favorisées	
	Variétés plus couvrantes, plus hautes	Attention à la verse Antagonisme entre choix de variétés tolérantes aux maladies et aux insectes			
<b>Perturber le cycle des mauvaises herbes</b>	Précédent allélopathique				Effet dépressif sur la croissance du suivant maïs ou soja
	Désherbage mécanique	Pertes de pieds	Pertes de pieds	Pertes de pieds	

### *2-Conséquences de l'enherbement d'une parcelle sur les besoins en azote de la culture*

En agriculture biologique, voire en agriculture conventionnelle en cas de fortes infestations de mauvaises herbes, la concurrence pour l'azote entre culture et adventices peut être telle que l'on peut légitimement se poser la question des conséquences sur la flore (croissance et production de semences) et la culture et donc de l'intérêt d'une fertilisation azotée de printemps. La question est d'autant plus pressante en agriculture biologique que l'azote apporté est coûteux et que la qualité du blé en dépend. Casagrande (2008) a établi une relation entre la densité d'adventices à un stade très précoce du blé biologique et la probabilité de dépasser un rendement ou une teneur en protéine. Cette relation permet ensuite de définir la fertilisation azotée la plus appropriée compte tenu de la pression de mauvaises herbes.

### *3-Conséquences de ces nouvelles pratiques sur les autres critères de la durabilité : énergie et temps de travail*

Les solutions agronomiques décrites ici ont presque toutes des conséquences supposées et reconnues sur l'organisation du travail (décalage date de semis, implantation d'inter-culture ou de précédent allélopathique) ou l'énergie utilisée (travail du sol avant semis et désherbage mécanique). Ces itinéraires techniques réduisant l'utilisation d'herbicides doivent donc être évalués sur plusieurs critères : performance économique bien entendu, mais aussi énergie (efficacité, coût), temps de travail (durée, conflit de chantier), valeur agronomique (objectif atteint, effets induits non souhaités, effets à long terme sur la flore). C'est en partie ce vers quoi s'orientent et se sont orientés un certain nombre de travaux comme ceux du RMT Systèmes de culture Innovants, faisant suite au projet Casdar du même nom, ceux sur l'expérimentation système à Dijon, ceux sur les itinéraires techniques intégrés du colza (Projet Casdar 2009-2011)

**Remerciements :** *Ce bilan de connaissances n'aurait pas pu être réalisé sans la participation de nombreux collègues, tels que N. Munier Jolain, B. Chauvel, N. Colbach, T. Doré, S. Médiène, J.F. Dejoux, F. Ferré, M. Casagrande. Nous les remercions de nous avoir permis d'illustrer leurs travaux. Un certain nombre d'expérimentations ont été réalisées pour acquérir ces connaissances ; nous remercions donc l'ensemble des techniciens qui ont assuré le suivi de ces expérimentations, à la fois sur Dijon et sur Grignon. Enfin, un certain nombre d'agriculteurs ont accepté d'accueillir des essais, d'expliquer leurs pratiques, nous leurs en sommes également reconnaissants.*

### **Références bibliographiques**

Casagrande M., 2008. Evaluation précoce des performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines) : une approche combinée de diagnostic agronomique, de modélisation à l'aide

d'indicateurs de nuisibilité et d'études des pratiques dans les exploitations agricoles. Thèse de Doctorat AgroParisTech, 136 p.

Chauvel B., Biju-Duval L., Jouy L., 2001b. Gestion des populations de vulpins résistants : quelles possibilités offrent les pratiques culturales ? *Phytoma*, 544 : 30- 34.

Chauvel B., Guillemain J.P., Colbach N., Gasquez J., 2001a. Evaluation of cropping systems for management of herbicide resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Prot*, 20 : 127-137.

Dejoux J.F., 1999. Evaluation agronomique environnementale et économique d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis très précoces, Thèse de Doctorat INA P-G Paris 243p.

Dejoux J.F., Ferré F., Meynard J.M., 1999. Effects of sowing date and nitrogen availability on competitiveness of rapeseed against weeds in order to develop new strategies of weed control with reduction of herbicide use, 10th International rapeseed congress, Canberra (Australia), 1999/09/26-29, CD-Rom New horizons for an old crop

Delabays N., Ançay A., Mermillod G., 1998. Recherche d'espèces végétales à propriétés allélopathiques. *Rev suisse Vitic Arboric Hortic* 6, 383-387.

Delabays N., Mermillod G., 2001. Mise en évidence, au champ, des propriétés allélopathiques de l'*Artemisia annua* L. In: XVIIIème conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes, 269-275.

Delabays N., Munier-Jolain N., 2004. Inhibition de la croissance des mauvaises herbes après incorporation au sol de résidus végétaux: allélopathie ou modification du cycle de l'azote. XIXème Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes, AFPP.

Doré T., Sène M., Pellissier F., Gallet C., 2004. Approche agronomique de l'allélopathie, *Cahiers Agricultures* 13, 249-256.

Ecophyto R&D, travail en cours

Ferré F., Doré T., Dejoux J.F., Meynard J.M., Grandeau G., 2000. Evolution quantitative de la flore adventice dicotylédone au cours du cycle du colza pour différentes dates de semis et niveaux d'azote disponible au semis. 11ème colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon (France), 06-08 septembre 2000

Goldberg D.E., Miller T.E., 1990. Effects of the different resource additions on species diversity in an annual plant community. *Ecology* 71, 213-225.

Gran-Aymerich L., 2006. Solutions agronomiques limitant le recours aux herbicides. Mémoire de fin d'études Agro Montpellier.

Guide simplifié de techniques alternatives de désherbage des cultures. 2008. Chambre d'agriculture de Cote d'or. Disponible sur le site internet du Cetiom.

Hauggaard-Nielsen H., Andersen M.K., Jornsgaard B., Jensen E.S., 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Research* , 95 : 256-267 .

Inderjit S., Keating K.I., 1996. Allelopathy: principles, procedures, processes and promises for biological control. *Advances in Agronomy* 67, 141-231.

Le Corre V., Assémat L., 2000. Predicting weed seed production from spatialized data: a case study using *Setaria viridis* and *Solanum nigrum* in maize. In: XIème Colloque International sur la Biologie des Mauvaises Herbes, p 297-304.

Lecomte C., Heumez E., Pluchard P., 2000. Identification de différences génotypiques dans la réponse aux contraintes environnementales : cas de la concurrence due aux mauvaises herbes dans une culture de blé tendre d'hiver. In : Maillard P., Bonhomme R. (Eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. INRA, Paris, p. 539-558.

- Lieven J., Quéré L., Lucas J.-L., 2008. Oilseed rape weed integrated management: concern of mechanical weed control. International Endure congress: diversifying crop protection. 13-15 octobre 2008 La Grande Motte France. [www.endure-network.eu](http://www.endure-network.eu).
- Médiène S., 2008, Analysis of weed diversity in alfalfa (*Medicago sativa*). In: Hopkins A. *et al.* (Eds.), 22nd General Meeting of the European Grassland Federation. Uppsala (Sweden), p 141-143.
- Médiène S., Charrier X., 2008, Weed flora dynamics during the first years of grassland establishment. In: Hopkins A. *et al.* (Eds.), 22nd General Meeting of the European Grassland Federation. Uppsala (Sweden), p. 278-280
- Meiss H., Naulin C., Waldhardt R., Caneill J., Munier-Jolain N., 2008. Arable weeds are controlled by perennial forage crops due to different mechanisms. 11th European Ecological Conference of the European Ecological Federation. 15-19 September 2007, Leipzig, Germany
- Meiss H., Munier-Jolain N., Henriot F., Caneill J., 2008. Effects of biomass, age and functional traits on regrowth of arable weeds after cutting. *Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XXI*, 493-499
- Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2005. Stratégies de Protection Intégrée contre les adventices des cultures : le retour de l'agronomie. In: Regnault-Roger C. (Ed.), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*, Lavoisier, Paris, p. 411-430.
- Munier-Jolain N., Kubiak P., Maillet-Mézeray J., Quéré L., Rodriguez A., Brochard A., Muchembled C., Verdier JL, 2006. Decid'Herb : un logiciel d'aide au choix d'une méthode de lutte contre les mauvaises herbes pour une agriculture respectueuse de l'environnement. 3ème Conf Int. sur les moyens alternatifs de Protection des Cultures, AFPP, Lille, 13-15 mars 2006
- Ofori F., Stern W.R., 1987. Cereal-legume intercropping systems. *Advances in Agronomy* 41, 41-90.
- Olofsdotter M., Mallik A.U., 2001. Allelopathy symposium: introduction. *Agronomy Journal* 93, 1-2.
- Poggio S.L., 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 109, 48-58.
- Rice E.L., 1984. *Allelopathy*. 2nd ed. Orlando (Florida), Academic Press, Inc., 424 p.
- Sim L.C., Froud-Williams R.J., Gooding M.J., 2007a. The influence of winter oilseed rape canopy size on grass weed growth weed seed return. *Journal of Agricultural Science* 145, 313-327.
- Sim L.C., Froud-Williams R.J., Gooding M.J., 2007b. The influence of winter oilseed rape cultivar and grass genotype on the competitive balance between crop and grass weeds. *Journal of Agricultural Science* 145, 329-342.
- Tsubo M., Walker S., 2004. Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under well-watered conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 190, 168-176.
- Tsubo M., Walker S., Mukhala E., 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/intercropping systems with different row orientation. *Field Crops Research* 71, 17-29.
- Valantin-Morison M., Ferré F., Quéré L., 2004. Améliorer la compétitivité du colza d'hiver vis-à-vis des adventices et réduire l'utilisation d'herbicides. *Oléoscope* 77, 17-19
- Valantin-Morison M., Grandeau G., Meynard J.M., 2003. La conduite du colza en agriculture biologique : une utopie ou bientôt une réalité ? *Alter Agri* juillet Août 2003
- Valantin-Morison M., Meynard J.M., 2008. Yield variability of Organic Winter Oil Seed Rape (WOSR) in France: a diagnosis on a network of farmers fields. *Agronomy for Sustainable Development* 28 (2008) DOI: 10.1051/agro:2008026

## **Utilisation des mulchs vivants pour la maîtrise des flores adventices**

**S. de Tourdonnet<sup>1</sup>, I. Shili<sup>1</sup>, E. Scopel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>: AgroParisTech, Département SIAFEE, UMR d'Agronomie INRA/AgroParisTech, BP 01, 78 850 Thiverval-Grignon

<sup>2</sup>: CIRAD, UMR System, CIRAD PERSYST / EMBRAPA-Cerrados, Km 18, BR 020 - Rodovia Brasília/Fortaleza, CP 08223, CEP 73310-970, Planaltina, DF, BRASIL

Correspondance : [tourdonn@grignon.inra.fr](mailto:tourdonn@grignon.inra.fr)

### **Résumé**

Les mulchs vivants sont des plantes de couverture cultivées en association avec une culture commerciale de manière à fournir des services écologiques et agronomiques comme la protection contre l'érosion, l'accroissement de la fertilité des sols et de la biodiversité ou l'étouffement des adventices. Utiliser des mulchs vivants en association avec une culture commerciale peut permettre de diminuer les infestations d'adventices grâce à des processus de compétition sur les ressources. La principale difficulté dans l'utilisation des mulchs vivants est leur manque de sélectivité : une plante de couverture assez compétitive pour maîtriser les adventices a souvent un impact négatif sur la croissance et le rendement de la culture commerciale. Il est nécessaire de concevoir des modalités de conduites innovantes pour réduire la compétition entre le mulch vivant et la culture commerciale sans perdre les bénéfices en termes de contrôle des adventices.

### **Abstract**

Living mulches are cover crops grown with a cash crop to provide ecological and agronomical benefits including protecting soils from erosion, improving soil fertility and biodiversity and suppressing weeds. Intercropping living mulches into cropping systems is a possible way to suppress weeds because weed and living mulch plants compete for the same resources. The major hurdle to the adoption and use of living mulches is lack of selectivity: a living mulch that is competitive enough to suppress weeds will often suppress crop growth and yield. Creative management approaches are required to reduce competition between the living mulch and cash crop species without eliminating the benefits to weed management.

---

### **Introduction**

Le développement et la nuisibilité des flores adventices résultent d'interactions complexes entre peuplement cultivé et adventices sous l'effet des techniques culturales et des conditions du milieu. Un des moyens de maîtriser la flore adventice est de jouer sur ces interactions entre plantes pour qu'elles se fassent au bénéfice de la culture commerciale. On peut par exemple jouer sur la couverture du sol (utilisation de mulchs) ou l'architecture du peuplement pour rendre les conditions du milieu plus défavorables à la levée et la croissance de la flore adventice. Un moyen d'accroître ces possibilités d'utilisation des régulations biologiques est d'introduire des plantes de couverture dans la rotation qui vont jouer à la fois le rôle de mulch vivant et modifier l'architecture du peuplement. Ces plantes, qui ne sont généralement pas récoltées, sont susceptibles d'assurer certains services écologiques et

agronomiques : étouffement des adventices, protection du sol, création et maintien de la porosité, accroissement de la teneur en matière organique et de la biodiversité, fixation symbiotique d'azote etc. (Hartwig et Ammon, 2002). Les plantes de couverture, qui sont soit des cultures pures (phacélie, vesce, radis etc.) soit des mélanges d'espèces pour accroître leur plurifonctionnalité, sont généralement cultivées pendant la période d'interculture uniquement (Thomas, 2005). Toutefois, dans des systèmes sans travail du sol, on peut également semer directement la culture commerciale à travers ces mulchs laissés vivant conduisant ainsi à un système de cultures associées (Hartwig et Ammon, 2002). On se place alors dans le cadre de l'agriculture de conservation, fondée sur un travail minimum du sol et le maintien d'un couvert végétal permanent (Triomphe *et al.*, 2007).

Nous illustrerons l'usage des mulchs vivants pour maîtriser les adventices à travers l'exemple des techniques culturales sans labour (TSL) et de l'agriculture de conservation et ceci pour plusieurs raisons :

- Ces techniques sans labour se développent rapidement à travers le monde (on compte plus de 25 millions d'hectares sans travail du sol au Brésil ou aux Etats-Unis) et en France où la dernière enquête de SCEES sur les pratiques agricoles montre qu'un tiers de la sole française est semée sans labour (Labreuche *et al.*, 2007 ; Agreste, 2008).
- Les TSL conduisent souvent à un accroissement de la biodiversité et de l'activité biologique au sein des parcelles agricoles (Holland, 2004 ; de Tourdonnet *et al.*, 2007 ; de Tourdonnet, 2008a) ce qui élargit les possibilités d'usage de ces régulations biologiques pour conduire les systèmes de culture.
- L'accroissement de la biodiversité s'accompagne d'une pression accrue de certains bioagresseurs et notamment des adventices qui ne sont plus enfouies par le labour (Debaeke et Orlando, 1994). Cela peut conduire les agriculteurs à accroître l'usage des herbicides, comme le montre l'enquête du SCEES (Agreste, 2008). Ceci pose un réel problème dans le contexte actuel. Réduire l'utilisation d'herbicide par une valorisation des régulations biologiques devient donc un enjeu majeur pour la durabilité de ces systèmes.
- Le développement de l'agriculture de conservation s'accompagne souvent de l'usage de plantes de couverture. Ceci accroît les possibilités de maîtriser la flore adventice par des mulchs vivants (Carof *et al.*, 2007a, b).

Les TSL représentent donc une innovation importante pour laquelle la valorisation de régulations biologiques, notamment via l'usage de plantes de couverture, est un enjeu majeur pour maîtriser la pression accrue des adventices tout en diminuant l'usage des herbicides. L'objectif de cet article est de faire un point sur l'utilisation des mulchs vivant pour maîtriser la flore adventice à partir de l'analyse des processus écologiques en cause et des modalités d'usage de ces processus.

## **Mulchs vivants, compétition et facilitation**

L'introduction d'un mulch vivant associé à la culture commerciale modifie les conditions du milieu. Ceci peut conduire à deux types d'interactions entre espèces végétales : compétition et facilitation. Une interaction compétitive apparaît lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement néfaste pour l'autre espèce (Callaway et Walker, 1997). A l'inverse, une interaction facilitée existe lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement favorable pour l'autre espèce (Bruno *et al.*, 2003). Généralement, l'effet global d'une population végétale sur une autre résulte de la combinaison d'interactions compétitives et facilitées. L'enjeu est donc de déplacer cet équilibre dans le sens de la compétition pour les adventices et de la facilitation pour la culture commerciale, à travers le choix et la conduite des couverts vivants.

L'usage de couverts vivants peut permettre d'accroître la compétition exercée sur les populations d'adventices. Si la plante de couverture se développe avant la période d'émergence des adventices, la présence d'un couvert végétal interceptant la lumière crée des conditions défavorables à la germination, l'émergence et la croissance des adventices. Plusieurs facteurs importants pour la germination des adventices (lumière, proportion d'infra-rouge, amplitude thermique) seront moins favorables sous un couvert vivant (Teasdale et Daughtry, 1993). La germination des adventices peut également être inhibée par la sécrétion de substances allélopathiques par le mulch vivant (White *et al.*, 1989 ; Inderjit et Keating, 1999 ; Hoagland *et al.*, 2008). Toutefois, ce phénomène, difficile à différencier de la compétition en conditions naturelles, est très sensible à de nombreux facteurs qui peuvent en limiter les effets : âge des plantes, caractéristiques du sol, conditions du milieu, activité biologique, etc. (Teasdale, 1993). Ce mulch vivant exerce également une compétition sur les ressources du milieu (lumière, eau, nutriments) qui peut se faire au détriment de la croissance des adventices (Hollander *et al.*, 2007b). Toutefois, les adventices peuvent s'adapter à cet environnement plus compétitif si la couverture du sol n'est pas totale et permanente ou par des adaptations morphologiques et physiologiques (Teasdale, 1993). Il est donc essentiel que les plantes de couverture occupent les mêmes niches écologiques que les adventices que l'on veut maîtriser, dans le temps et dans l'espace, pour que cet effet de compétition soit efficace. Cependant, la niche écologique occupée par les adventices est généralement la même que celle occupée par la culture commerciale (c'est bien pour cela qu'elles sont nuisibles). On voit donc se dessiner un problème épineux : comment faire pour que les plantes de couverture soient compétitives pour les adventices sans être compétitives pour la culture commerciale, ce qui affecterait le rendement ?

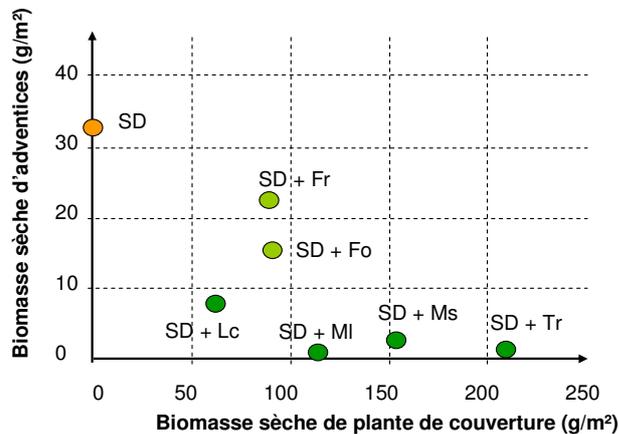
Un moyen de résoudre cette difficulté est de jouer sur les décalages de cycles entre adventices, culture commerciale et plante de couverture. Par exemple, Enache et Ilnicki (1990) ont proposé un système où le trèfle souterrain, *Trifolium subterraneum* L., semé en automne produit un couvert dense puis entre en sénescence au printemps, quelques semaines après le semis direct du maïs à travers ce mulch vivant. Les résidus de *T. subterraneum* desséchés continuent à exercer une action dépressive sur la germination des adventices pendant la culture de maïs puis, à l'automne suivant, les repousses de trèfle issues des semences permettent de recréer un couvert végétal pendant l'interculture. Dans ce système, les biomasses d'adventices étaient réduites de 53 à 94% par le mulch vivant pendant l'interculture, et de 11 à 76% dans le mulch mort pendant la culture de maïs, en comparaison avec un système sans plante de couverture. Des résultats analogues ont été obtenus sur d'autres systèmes, avec plus ou moins de décalage entre le semis de la plante de couverture et la culture commerciale, aussi bien en conditions tempérées (Teasdale et Daughtry, 1993 ; Ateh et Doll, 1996 ; Brandsaeter *et al.*, 1998 ; Hollander *et al.*, 2007a, b) que tropicales (Chikoye *et al.*, 2001 ; Akobundu *et al.*, 2000 ; Caamal-Maldonado, 2001 ; Buckles et Triomphe, 1999). Liebman et Dyck (1993) ont montré à partir d'une analyse bibliographique que l'usage d'un couvert vivant avait permis de diminuer la biomasse d'adventices dans 47 publications, n'avait eu aucun effet dans 3 cas et avait eu un effet contraire dans 4 cas.

L'usage de cette stratégie de décalage des cycles est conditionnée par :

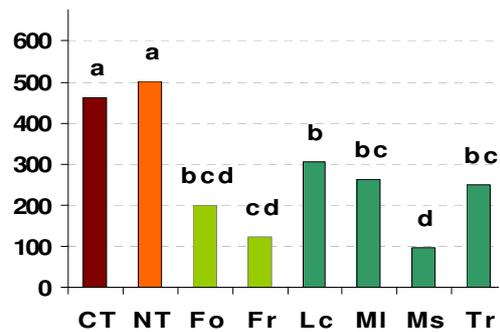
- **la phénologie des espèces** : il faut choisir des plantes de couverture qui s'établissent plus rapidement que les adventices et dont le pic de croissance coïncide avec la période d'émergence des adventices mais pas avec la période de croissance de la culture commerciale (Buhler *et al.*, 2001).
- **les conditions pédoclimatiques et la stabilité des conditions climatiques** : tout retard dans la sénescence de la plante de couverture peut provoquer une compétition forte aux stades précoces de la culture commerciale et affecter son rendement. A l'inverse, si le ressemis et la croissance de la plante de couverture à l'automne sont affectés par les conditions climatiques, l'effet sur les adventices sera beaucoup moins net.

## Mulchs vivants et sélectivité

Cependant, la principale difficulté dans l'usage de mulchs vivants pour maîtriser les adventices est leur manque de sélectivité. Plusieurs travaux montrent qu'un bon contrôle des adventices par des couverts vivants induit souvent des pertes de rendement de la culture commerciale, même si ce n'est pas toujours le cas (Ilnicki et Enache, 1992 ; Teasdale, 1993). Il est donc difficile d'exercer une compétition sur les adventices en évitant une compétition sur la culture commerciale. Des résultats obtenus en France illustrent ce phénomène (de Tourdonnet *et al.*, 2003 ; Carof *et al.* 2007a ; de Tourdonnet, 2008b). Ces auteurs ont testé l'usage de six plantes de couverture : la fétuque ovine (*Festuca ovina* L.), la fétuque rouge gazonnante (*Festuca rubra* L.), le lotier corniculé (*Lotus corniculatus* L.), la minette (*Medicago lupulina* L.), la luzerne (*Medicago sativa* L.) et le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.). Le blé était semé directement à travers ce couvert préalablement broyé, mais maintenu vivant pendant plusieurs années. Le maintien de ce couvert vivant permanent a permis de diminuer les biomasses d'adventices avec une efficacité variable selon les espèces et la biomasse produite (Figure 1). Cependant, en l'absence d'utilisation d'herbicides, ces plantes de couverture ont affecté le rendement (Figure 2) en raison d'une compétition exercée sur le blé ou d'un manque de compétition exercée sur les adventices qui se sont alors révélés nuisibles pour le blé (Carof *et al.*, 2007a).



**Figure 1** : Effet de la biomasse de plantes de couverture sur la biomasse d'adventices au stade floraison du blé en semis direct, sans application d'herbicide.



**Figure 2** : Impact de l'usage d'une plante de couverture sur le rendement du blé (g/m<sup>2</sup>), sans utilisation d'herbicide (sauf pour les témoins CT et NT)

CT : labour, SD et NT : semis direct sans couvert, Fr : fétuque rouge, Fo : fétuque ovine, Lc : lotier corniculé, MI : minette, Ms : luzerne, Tr : trèfle blanc.

Ces travaux ont également permis d'identifier les périodes durant lesquelles s'exerçait la compétition entre blé et plante de couverture et de hiérarchiser les facteurs limitants (Carof *et al.*, 2007b) de manière à définir des stratégies de conduite des plantes de couverture permettant d'éviter cette compétition sur le blé. On reste alors dans l'idée de décaler les cycles de croissance entre plante de couverture et culture commerciale pour orienter la compétition vers les adventices, mais en jouant non pas sur le choix de l'espèce de couverture mais sur sa conduite. Les possibilités techniques sont d'effectuer un broyage ou une fauche du couvert (pendant l'interculture) ou d'utiliser des herbicides sélectifs du couvert à faible dose pour ralentir sa croissance à certaines dates clé, sans le tuer. Cela donne un avantage compétitif au blé qui peut être décisif pour lui permettre de dominer la plante de couverture. Ce type de stratégie a permis de diminuer la compétition sur le blé et d'améliorer le rendement obtenu (Carof *et al.*, 2007a) mais il est nécessaire d'accroître les connaissances sur les processus de compétition et de facilitation en cause pour pouvoir optimiser le raisonnement de ces interventions. Devant la complexité des interactions entre plantes de couverture, adventices et cultures

commerciales, et la sensibilité de ces processus au contexte pédoclimatique, la modélisation de ces cultures associées est un outil précieux pour comprendre les processus et leur sensibilité et pour tester différentes modalités de conduite technique (Shili *et al.*, 2008).

## Conclusion

L'utilisation de mulchs vivants pour la maîtrise de la flore adventice passe donc par le pilotage délicat d'un équilibre entre processus écologiques. Cela nécessite d'approfondir les connaissances sur ces régulations biologiques de compétition, facilitation et allélopathie au sein de l'agrosystème. Cela nécessite également de mieux connaître l'impact des techniques culturales sur cet équilibre entre processus de manière à l'orienter en fonction de finalités à la fois agronomiques et écologiques. Le développement de l'utilisation de mulchs vivants nécessite des connaissances spécifiques, adaptées au contexte local des conditions du milieu (du fait de la sensibilité des régulations biologiques à ces conditions) et des acteurs de la production agricole. Cela ne pourra se faire que dans le cadre d'un processus d'innovation où apprentissage collectif et co-conception de systèmes de culture innovants entre les agriculteurs, les organismes de développement et la recherche joueront sans doute un rôle prépondérant.

## Références bibliographiques

- Agreste, 2008. Dans le sillon du non labour. Agreste primeur n°207.
- Akobundu I.O., Udensi U.E., Chikoye D., 2000. Velvetbean (*Mucuna* spp.) suppresses speargrass (*Imperata cylindrical* (L.) Raeuschel) and increases maize yield. *Int. J. Pest Management* 46, 103-108.
- Ateh C.M., Doll J.D., 1996. Spring-planted winter rye (*Secale cereale*) as a living mulch to control weeds in soybean (*Glycine max*). *Weed Technology* 10, 347-353.
- Brandsaeter L.O., Netland J., Meadow R. 1998. Yields, weeds, pests and soil nitrogen in a white cabbage living mulch system. *Biological Agriculture & Horticulture* 16, 291-309.
- Bruno J.F., Stachowicz J.J., Bertness, M.D., 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 119-125.
- Buckles D., Triomphe B., 1999. Adoption of mucuna in the farming systems of northern Honduras. *Agroforestry Systems* 47, 67-91.
- Buhler D.D., Kohler K.A., Foster M.S., 2001. Corn, soybean, and weed responses to spring-seeded smother plants. *J. Sustain. Agric.* 18, 63-79.
- Caamal-Maldonado J.A., Jimenez-Osornio J.J., Torres-Barrag A., Anaya A.L., 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agron. J.* 93, 27-36.
- Callaway R.M., Walker L. R., 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology* 78, 1958-1965.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J. 2007a. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system (I): yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 347-356.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J. 2007b. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system (II): competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 357-365.
- Chikoye D., Ekeleme F. Udensi U.E. 2001. Cogongrass suppression by intercropping cover crops in corn/cassava systems. *Weed Sci.* 49, 658-667.
- de Tourdonnet S. 2008a. Impacts environnementaux des techniques sans labour: les TSL modifient la qualité des sols et la biodiversité. *Perspectives Agricoles* 344, 36-41.

- de Tourdonnet S. 2008b. Utilisation de cultures associées en semis direct. *Techniques Culturelles Simplifiées*, 46, 21-23.
- de Tourdonnet S., Carof M., Saulas P. 2003. A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crop in open fields in France. In "Proceedings of the second World Congress on Conservation Agriculture", Iguassu Falls (Brazil), p. 262-265
- de Tourdonnet S., Chenu C., Straczek A., Cortet J., Felix I., Gontier L., Heddadj D., Labreuche J., Laval K., Longueval C., Richard G., Tessier D., 2007. Impacts des techniques culturales sans labour sur la qualité des sols et la biodiversité. Rapport projet ADEME 'Impacts environnementaux des TCSL'.
- Debaeke P., Orlando D., 1994. Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice: conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. In : G. Monnier, G. Thévenet, B. Lesaffre (Eds.), *Simplification du travail du sol*, INRA éditions, Paris (France), p. 35-62.
- Enache A.J., Ilnicki R.D., 1990. Weed control by subterranean clover (*Trifolium subterraneum*) used as a living mulch. *Weed Tech.* 4, 534-538.
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688-699.
- Hoagland L., Carpenter-Boggs L., Reganold J.P., Mazzola M., 2008. Role of native soil biology in Brassicaceous seed meal-induced weed suppression. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1689-1697.
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture Ecosystems & Environment* 103, 1-25.
- Hollander N.G.d., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007a. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species. *European Journal of Agronomy* 26, 92-103.
- Hollander N.G.d., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007b. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: II. Competitive ability of several clover species. *European Journal of Agronomy* 26, 104-112.
- Inderjit S., Keating K.I., 1999. Allelopathy: Principles, procedures, processes, and promises for biological control. *Adv. Agron.* 67, 141-231.
- Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J.P., Duval R., Ganteil A., Jouy L., Quere L., Boizard H., Roger-Estrade J. 2007. La pratique des techniques culturales sans labour en France. Rapport projet ADEME 'Impacts environnementaux des TCSL'
- Liebman M., Dyck E., 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecologic. Applic.* 3, 92-122.
- Shili I., de Tourdonnet S., Launay M., Doré T., 2008. Intercropping winter wheat with a cover crop in no-till: a modelling approach. In : ESA (Ed.), *Proceedings of the tenth ESA Congress*, 15-19 sept, Bologne (Italy), p. 753.
- Teasdale J.R., 1993. Reduced herbicide weed management systems for no tillage corn (*Zea mays*) in a hairy vetch (*Vicia villosa*) cover crop. *Weed Technology* 7, 879-883.
- Teasdale J.R., 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475-479.
- Teasdale J.R., Daughtry C.S.T., 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch. *Weed Sci.* 41, 207-212.
- Thomas F., 2005 Couverts végétaux. *Techniques Culturelles Simplifiées* 33, 12-25.
- Triomphe B., Goulet F., Dreyfus F., de Tourdonnet S., 2007. Du labour au non-labour: pratiques, innovations et enjeux du Sud au Nord. In : R. Bourrigaud, F. Sigaut (Eds.), *Nous labourons*, Editions du centre d'histoire du travail, Nantes, p. 371-386.
- White J.G., Scott T.W., 1991. Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research* 28, 135-141

## **Utilisation des mulchs vivants pour la maîtrise des flores adventices**

**S. de Tourdonnet<sup>1</sup>, I. Shili<sup>1</sup>, E. Scopel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>: AgroParisTech, Département SIAFEE, UMR d'Agronomie INRA/AgroParisTech, BP 01, 78 850 Thiverval-Grignon

<sup>2</sup>: CIRAD, UMR System, CIRAD PERSYST / EMBRAPA-Cerrados, Km 18, BR 020 - Rodovia Brasília/Fortaleza, CP 08223, CEP 73310-970, Planaltina, DF, BRASIL

Correspondance : [tourdonn@grignon.inra.fr](mailto:tourdonn@grignon.inra.fr)

### **Résumé**

Les mulchs vivants sont des plantes de couverture cultivées en association avec une culture commerciale de manière à fournir des services écologiques et agronomiques comme la protection contre l'érosion, l'accroissement de la fertilité des sols et de la biodiversité ou l'étouffement des adventices. Utiliser des mulchs vivants en association avec une culture commerciale peut permettre de diminuer les infestations d'adventices grâce à des processus de compétition sur les ressources. La principale difficulté dans l'utilisation des mulchs vivants est leur manque de sélectivité : une plante de couverture assez compétitive pour maîtriser les adventices a souvent un impact négatif sur la croissance et le rendement de la culture commerciale. Il est nécessaire de concevoir des modalités de conduites innovantes pour réduire la compétition entre le mulch vivant et la culture commerciale sans perdre les bénéfices en termes de contrôle des adventices.

### **Abstract**

Living mulches are cover crops grown with a cash crop to provide ecological and agronomical benefits including protecting soils from erosion, improving soil fertility and biodiversity and suppressing weeds. Intercropping living mulches into cropping systems is a possible way to suppress weeds because weed and living mulch plants compete for the same resources. The major hurdle to the adoption and use of living mulches is lack of selectivity: a living mulch that is competitive enough to suppress weeds will often suppress crop growth and yield. Creative management approaches are required to reduce competition between the living mulch and cash crop species without eliminating the benefits to weed management.

---

### **Introduction**

Le développement et la nuisibilité des flores adventices résultent d'interactions complexes entre peuplement cultivé et adventices sous l'effet des techniques culturales et des conditions du milieu. Un des moyens de maîtriser la flore adventice est de jouer sur ces interactions entre plantes pour qu'elles se fassent au bénéfice de la culture commerciale. On peut par exemple jouer sur la couverture du sol (utilisation de mulchs) ou l'architecture du peuplement pour rendre les conditions du milieu plus défavorables à la levée et la croissance de la flore adventice. Un moyen d'accroître ces possibilités d'utilisation des régulations biologiques est d'introduire des plantes de couverture dans la rotation qui vont jouer à la fois le rôle de mulch vivant et modifier l'architecture du peuplement. Ces plantes, qui ne sont généralement pas récoltées, sont susceptibles d'assurer certains services écologiques et

agronomiques : étouffement des adventices, protection du sol, création et maintien de la porosité, accroissement de la teneur en matière organique et de la biodiversité, fixation symbiotique d'azote etc. (Hartwig et Ammon, 2002). Les plantes de couverture, qui sont soit des cultures pures (phacélie, vesce, radis etc.) soit des mélanges d'espèces pour accroître leur plurifonctionnalité, sont généralement cultivées pendant la période d'interculture uniquement (Thomas, 2005). Toutefois, dans des systèmes sans travail du sol, on peut également semer directement la culture commerciale à travers ces mulchs laissés vivant conduisant ainsi à un système de cultures associées (Hartwig et Ammon, 2002). On se place alors dans le cadre de l'agriculture de conservation, fondée sur un travail minimum du sol et le maintien d'un couvert végétal permanent (Triomphe *et al.*, 2007).

Nous illustrerons l'usage des mulchs vivants pour maîtriser les adventices à travers l'exemple des techniques culturales sans labour (TSL) et de l'agriculture de conservation et ceci pour plusieurs raisons :

- Ces techniques sans labour se développent rapidement à travers le monde (on compte plus de 25 millions d'hectares sans travail du sol au Brésil ou aux Etats-Unis) et en France où la dernière enquête de SCEES sur les pratiques agricoles montre qu'un tiers de la sole française est semée sans labour (Labreuche *et al.*, 2007 ; Agreste, 2008).
- Les TSL conduisent souvent à un accroissement de la biodiversité et de l'activité biologique au sein des parcelles agricoles (Holland, 2004 ; de Tourdonnet *et al.*, 2007 ; de Tourdonnet, 2008a) ce qui élargit les possibilités d'usage de ces régulations biologiques pour conduire les systèmes de culture.
- L'accroissement de la biodiversité s'accompagne d'une pression accrue de certains bioagresseurs et notamment des adventices qui ne sont plus enfouies par le labour (Debaeke et Orlando, 1994). Cela peut conduire les agriculteurs à accroître l'usage des herbicides, comme le montre l'enquête du SCEES (Agreste, 2008). Ceci pose un réel problème dans le contexte actuel. Réduire l'utilisation d'herbicide par une valorisation des régulations biologiques devient donc un enjeu majeur pour la durabilité de ces systèmes.
- Le développement de l'agriculture de conservation s'accompagne souvent de l'usage de plantes de couverture. Ceci accroît les possibilités de maîtriser la flore adventice par des mulchs vivants (Carof *et al.*, 2007a, b).

Les TSL représentent donc une innovation importante pour laquelle la valorisation de régulations biologiques, notamment via l'usage de plantes de couverture, est un enjeu majeur pour maîtriser la pression accrue des adventices tout en diminuant l'usage des herbicides. L'objectif de cet article est de faire un point sur l'utilisation des mulchs vivant pour maîtriser la flore adventice à partir de l'analyse des processus écologiques en cause et des modalités d'usage de ces processus.

## **Mulchs vivants, compétition et facilitation**

L'introduction d'un mulch vivant associé à la culture commerciale modifie les conditions du milieu. Ceci peut conduire à deux types d'interactions entre espèces végétales : compétition et facilitation. Une interaction compétitive apparaît lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement néfaste pour l'autre espèce (Callaway et Walker, 1997). A l'inverse, une interaction facilitée existe lorsque l'une des deux espèces a un effet sur l'environnement favorable pour l'autre espèce (Bruno *et al.*, 2003). Généralement, l'effet global d'une population végétale sur une autre résulte de la combinaison d'interactions compétitives et facilitées. L'enjeu est donc de déplacer cet équilibre dans le sens de la compétition pour les adventices et de la facilitation pour la culture commerciale, à travers le choix et la conduite des couverts vivants.

L'usage de couverts vivants peut permettre d'accroître la compétition exercée sur les populations d'adventices. Si la plante de couverture se développe avant la période d'émergence des adventices, la présence d'un couvert végétal interceptant la lumière crée des conditions défavorables à la germination, l'émergence et la croissance des adventices. Plusieurs facteurs importants pour la germination des adventices (lumière, proportion d'infra-rouge, amplitude thermique) seront moins favorables sous un couvert vivant (Teasdale et Daughtry, 1993). La germination des adventices peut également être inhibée par la sécrétion de substances allélopathiques par le mulch vivant (White *et al.*, 1989 ; Inderjit et Keating, 1999 ; Hoagland *et al.*, 2008). Toutefois, ce phénomène, difficile à différencier de la compétition en conditions naturelles, est très sensible à de nombreux facteurs qui peuvent en limiter les effets : âge des plantes, caractéristiques du sol, conditions du milieu, activité biologique, etc. (Teasdale, 1993). Ce mulch vivant exerce également une compétition sur les ressources du milieu (lumière, eau, nutriments) qui peut se faire au détriment de la croissance des adventices (Hollander *et al.*, 2007b). Toutefois, les adventices peuvent s'adapter à cet environnement plus compétitif si la couverture du sol n'est pas totale et permanente ou par des adaptations morphologiques et physiologiques (Teasdale, 1993). Il est donc essentiel que les plantes de couverture occupent les mêmes niches écologiques que les adventices que l'on veut maîtriser, dans le temps et dans l'espace, pour que cet effet de compétition soit efficace. Cependant, la niche écologique occupée par les adventices est généralement la même que celle occupée par la culture commerciale (c'est bien pour cela qu'elles sont nuisibles). On voit donc se dessiner un problème épineux : comment faire pour que les plantes de couverture soient compétitives pour les adventices sans être compétitives pour la culture commerciale, ce qui affecterait le rendement ?

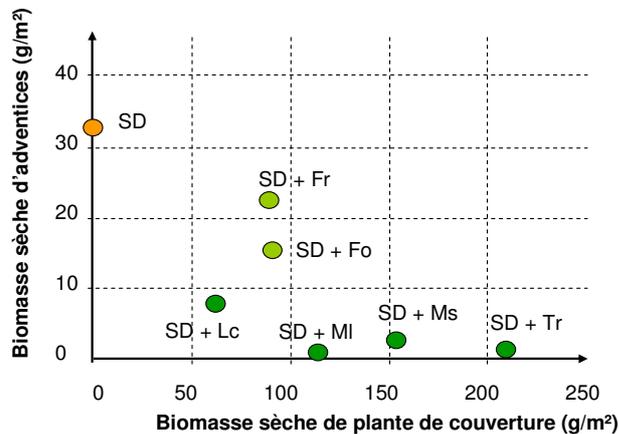
Un moyen de résoudre cette difficulté est de jouer sur les décalages de cycles entre adventices, culture commerciale et plante de couverture. Par exemple, Enache et Ilnicki (1990) ont proposé un système où le trèfle souterrain, *Trifolium subterraneum* L., semé en automne produit un couvert dense puis entre en sénescence au printemps, quelques semaines après le semis direct du maïs à travers ce mulch vivant. Les résidus de *T. subterraneum* desséchés continuent à exercer une action dépressive sur la germination des adventices pendant la culture de maïs puis, à l'automne suivant, les repousses de trèfle issues des semences permettent de recréer un couvert végétal pendant l'interculture. Dans ce système, les biomasses d'adventices étaient réduites de 53 à 94% par le mulch vivant pendant l'interculture, et de 11 à 76% dans le mulch mort pendant la culture de maïs, en comparaison avec un système sans plante de couverture. Des résultats analogues ont été obtenus sur d'autres systèmes, avec plus ou moins de décalage entre le semis de la plante de couverture et la culture commerciale, aussi bien en conditions tempérées (Teasdale et Daughtry, 1993 ; Ateh et Doll, 1996 ; Brandsaeter *et al.*, 1998 ; Hollander *et al.*, 2007a, b) que tropicales (Chikoye *et al.*, 2001 ; Akobundu *et al.*, 2000 ; Caamal-Maldonado, 2001 ; Buckles et Triomphe, 1999). Liebman et Dyck (1993) ont montré à partir d'une analyse bibliographique que l'usage d'un couvert vivant avait permis de diminuer la biomasse d'adventices dans 47 publications, n'avait eu aucun effet dans 3 cas et avait eu un effet contraire dans 4 cas.

L'usage de cette stratégie de décalage des cycles est conditionnée par :

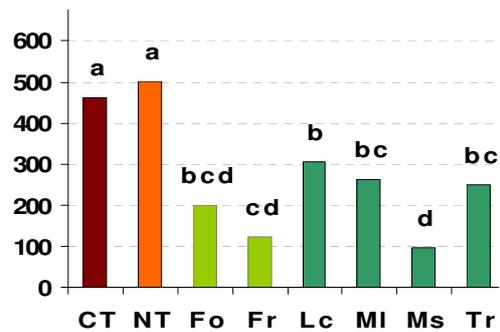
- **la phénologie des espèces** : il faut choisir des plantes de couverture qui s'établissent plus rapidement que les adventices et dont le pic de croissance coïncide avec la période d'émergence des adventices mais pas avec la période de croissance de la culture commerciale (Buhler *et al.*, 2001).
- **les conditions pédoclimatiques et la stabilité des conditions climatiques** : tout retard dans la sénescence de la plante de couverture peut provoquer une compétition forte aux stades précoces de la culture commerciale et affecter son rendement. A l'inverse, si le ressemis et la croissance de la plante de couverture à l'automne sont affectés par les conditions climatiques, l'effet sur les adventices sera beaucoup moins net.

## Mulchs vivants et sélectivité

Cependant, la principale difficulté dans l'usage de mulchs vivants pour maîtriser les adventices est leur manque de sélectivité. Plusieurs travaux montrent qu'un bon contrôle des adventices par des couverts vivants induit souvent des pertes de rendement de la culture commerciale, même si ce n'est pas toujours le cas (Ilnicki et Enache, 1992 ; Teasdale, 1993). Il est donc difficile d'exercer une compétition sur les adventices en évitant une compétition sur la culture commerciale. Des résultats obtenus en France illustrent ce phénomène (de Tourdonnet *et al.*, 2003 ; Carof *et al.* 2007a ; de Tourdonnet, 2008b). Ces auteurs ont testé l'usage de six plantes de couverture : la fétuque ovine (*Festuca ovina* L.), la fétuque rouge gazonnante (*Festuca rubra* L.), le lotier corniculé (*Lotus corniculatus* L.), la minette (*Medicago lupulina* L.), la luzerne (*Medicago sativa* L.) et le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.). Le blé était semé directement à travers ce couvert préalablement broyé, mais maintenu vivant pendant plusieurs années. Le maintien de ce couvert vivant permanent a permis de diminuer les biomasses d'adventices avec une efficacité variable selon les espèces et la biomasse produite (Figure 1). Cependant, en l'absence d'utilisation d'herbicides, ces plantes de couverture ont affecté le rendement (Figure 2) en raison d'une compétition exercée sur le blé ou d'un manque de compétition exercée sur les adventices qui se sont alors révélés nuisibles pour le blé (Carof *et al.*, 2007a).



**Figure 1** : Effet de la biomasse de plantes de couverture sur la biomasse d'adventices au stade floraison du blé en semis direct, sans application d'herbicide.



**Figure 2** : Impact de l'usage d'une plante de couverture sur le rendement du blé (g/m<sup>2</sup>), sans utilisation d'herbicide (sauf pour les témoins CT et NT)

CT : labour, SD et NT : semis direct sans couvert, Fr : fétuque rouge, Fo : fétuque ovine, Lc : lotier corniculé, MI : minette, Ms : luzerne, Tr : trèfle blanc.

Ces travaux ont également permis d'identifier les périodes durant lesquelles s'exerçait la compétition entre blé et plante de couverture et de hiérarchiser les facteurs limitants (Carof *et al.*, 2007b) de manière à définir des stratégies de conduite des plantes de couverture permettant d'éviter cette compétition sur le blé. On reste alors dans l'idée de décaler les cycles de croissance entre plante de couverture et culture commerciale pour orienter la compétition vers les adventices, mais en jouant non pas sur le choix de l'espèce de couverture mais sur sa conduite. Les possibilités techniques sont d'effectuer un broyage ou une fauche du couvert (pendant l'interculture) ou d'utiliser des herbicides sélectifs du couvert à faible dose pour ralentir sa croissance à certaines dates clé, sans le tuer. Cela donne un avantage compétitif au blé qui peut être décisif pour lui permettre de dominer la plante de couverture. Ce type de stratégie a permis de diminuer la compétition sur le blé et d'améliorer le rendement obtenu (Carof *et al.*, 2007a) mais il est nécessaire d'accroître les connaissances sur les processus de compétition et de facilitation en cause pour pouvoir optimiser le raisonnement de ces interventions. Devant la complexité des interactions entre plantes de couverture, adventices et cultures

commerciales, et la sensibilité de ces processus au contexte pédoclimatique, la modélisation de ces cultures associées est un outil précieux pour comprendre les processus et leur sensibilité et pour tester différentes modalités de conduite technique (Shili *et al.*, 2008).

## Conclusion

L'utilisation de mulchs vivants pour la maîtrise de la flore adventice passe donc par le pilotage délicat d'un équilibre entre processus écologiques. Cela nécessite d'approfondir les connaissances sur ces régulations biologiques de compétition, facilitation et allélopathie au sein de l'agrosystème. Cela nécessite également de mieux connaître l'impact des techniques culturales sur cet équilibre entre processus de manière à l'orienter en fonction de finalités à la fois agronomiques et écologiques. Le développement de l'utilisation de mulchs vivants nécessite des connaissances spécifiques, adaptées au contexte local des conditions du milieu (du fait de la sensibilité des régulations biologiques à ces conditions) et des acteurs de la production agricole. Cela ne pourra se faire que dans le cadre d'un processus d'innovation où apprentissage collectif et co-conception de systèmes de culture innovants entre les agriculteurs, les organismes de développement et la recherche joueront sans doute un rôle prépondérant.

## Références bibliographiques

- Agreste, 2008. Dans le sillon du non labour. Agreste primeur n°207.
- Akobundu I.O., Udensi U.E., Chikoye D., 2000. Velvetbean (*Mucuna* spp.) suppresses speargrass (*Imperata cylindrical* (L.) Raeuschel) and increases maize yield. *Int. J. Pest Management* 46, 103-108.
- Ateh C.M., Doll J.D., 1996. Spring-planted winter rye (*Secale cereale*) as a living mulch to control weeds in soybean (*Glycine max*). *Weed Technology* 10, 347-353.
- Brandsaeter L.O., Netland J., Meadow R. 1998. Yields, weeds, pests and soil nitrogen in a white cabbage living mulch system. *Biological Agriculture & Horticulture* 16, 291-309.
- Bruno J.F., Stachowicz J.J., Bertness, M.D., 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 119-125.
- Buckles D., Triomphe B., 1999. Adoption of mucuna in the farming systems of northern Honduras. *Agroforestry Systems* 47, 67-91.
- Buhler D.D., Kohler K.A., Foster M.S., 2001. Corn, soybean, and weed responses to spring-seeded smother plants. *J. Sustain. Agric.* 18, 63-79.
- Caamal-Maldonado J.A., Jimenez-Osornio J.J., Torres-Barrag A., Anaya A.L., 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agron. J.* 93, 27-36.
- Callaway R.M., Walker L. R., 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology* 78, 1958-1965.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J. 2007a. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system (I): yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 347-356.
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J. 2007b. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system (II): competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 357-365.
- Chikoye D., Ekeleme F. Udensi U.E. 2001. Cogongrass suppression by intercropping cover crops in corn/cassava systems. *Weed Sci.* 49, 658-667.
- de Tourdonnet S. 2008a. Impacts environnementaux des techniques sans labour: les TSL modifient la qualité des sols et la biodiversité. *Perspectives Agricoles* 344, 36-41.

- de Tourdonnet S. 2008b. Utilisation de cultures associées en semis direct. *Techniques Culturelles Simplifiées*, 46, 21-23.
- de Tourdonnet S., Carof M., Saulas P. 2003. A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crop in open fields in France. In "Proceedings of the second World Congress on Conservation Agriculture", Iguassu Falls (Brazil), p. 262-265
- de Tourdonnet S., Chenu C., Straczek A., Cortet J., Felix I., Gontier L., Heddadj D., Labreuche J., Laval K., Longueval C., Richard G., Tessier D., 2007. Impacts des techniques culturales sans labour sur la qualité des sols et la biodiversité. Rapport projet ADEME 'Impacts environnementaux des TCSL'.
- Debaeke P., Orlando D., 1994. Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice: conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation. In : G. Monnier, G. Thévenet, B. Lesaffre (Eds.), *Simplification du travail du sol*, INRA éditions, Paris (France), p. 35-62.
- Enache A.J., Ilnicki R.D., 1990. Weed control by subterranean clover (*Trifolium subterraneum*) used as a living mulch. *Weed Tech.* 4, 534-538.
- Hartwig N.L., Ammon H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688-699.
- Hoagland L., Carpenter-Boggs L., Reganold J.P., Mazzola M., 2008. Role of native soil biology in Brassicaceous seed meal-induced weed suppression. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1689-1697.
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture Ecosystems & Environment* 103, 1-25.
- Hollander N.G.d., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007a. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: I. Characteristics of several clover species. *European Journal of Agronomy* 26, 92-103.
- Hollander N.G.d., Bastiaans L., Kropff M.J., 2007b. Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design: II. Competitive ability of several clover species. *European Journal of Agronomy* 26, 104-112.
- Inderjit S., Keating K.I., 1999. Allelopathy: Principles, procedures, processes, and promises for biological control. *Adv. Agron.* 67, 141-231.
- Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J.P., Duval R., Ganteil A., Jouy L., Quere L., Boizard H., Roger-Estrade J. 2007. La pratique des techniques culturales sans labour en France. Rapport projet ADEME 'Impacts environnementaux des TCSL'
- Liebman M., Dyck E., 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecologic. Applic.* 3, 92-122.
- Shili I., de Tourdonnet S., Launay M., Doré T., 2008. Intercropping winter wheat with a cover crop in no-till: a modelling approach. In : ESA (Ed.), *Proceedings of the tenth ESA Congress*, 15-19 sept, Bologne (Italy), p. 753.
- Teasdale J.R., 1993. Reduced herbicide weed management systems for no tillage corn (*Zea mays*) in a hairy vetch (*Vicia villosa*) cover crop. *Weed Technology* 7, 879-883.
- Teasdale J.R., 1996. Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475-479.
- Teasdale J.R., Daughtry C.S.T., 1993. Weed suppression by live and desiccated hairy vetch. *Weed Sci.* 41, 207-212.
- Thomas F., 2005 Couverts végétaux. *Techniques Culturelles Simplifiées* 33, 12-25.
- Triomphe B., Goulet F., Dreyfus F., de Tourdonnet S., 2007. Du labour au non-labour: pratiques, innovations et enjeux du Sud au Nord. In : R. Bourrigaud, F. Sigaut (Eds.), *Nous labourons*, Editions du centre d'histoire du travail, Nantes, p. 371-386.
- White J.G., Scott T.W., 1991. Effects of perennial forage-legume living mulches on no-till winter wheat and rye. *Field Crops Research* 28, 135-141

## La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés

N. Colbach, A. Gardarin, S. Granger, J.P. Guillemain, N. Munier-Jolain

UMR 1210 Biologie et Gestion des Adventices, INRA ENESAD Université de Bourgogne, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

Correspondance : Nathalie.Colbach@dijon.inra.fr

### Résumé

L'UMR BGA développe des modèles simulant la dynamique des adventices des champs cultivés en fonction des effets cumulatifs des systèmes de culture. Ces modèles sont à la fois des outils d'analyse des interactions au sein de l'agro-système, des outils d'analyse de la diversité des réponses des espèces, et des outils d'évaluation *ex ante* de stratégies de gestion alternatives, proposées en réponse aux enjeux actuels de l'agriculture (notamment la baisse de la dépendance aux herbicides). Nous disposons de deux versions de modèle, l'une monospécifique 'vulpin' (ALOMYSYS), l'autre générique et plurispécifique (FLORSYS), fondées toutes deux sur la représentation du cycle biologique des adventices et sur des fonctions démographiques liées aux systèmes de culture, en interaction avec le climat et les états du milieu. La prise en compte des interactions nécessite de décomposer le système en processus individuels. Dans la version plurispécifique, la diversité des espèces est prise en compte par une approche fonctionnelle. Chaque espèce est représentée par un ensemble de traits, et les paramètres du modèle sont estimés à partir de traits facilement mesurables (poids moyen des semences par exemple). Une méthodologie d'évaluation de systèmes de culture et de tests de scénarii à partir d'ALOMYSYS et d'autres indicateurs est proposée au travers d'exemples rencontrés en exploitations agricoles en Côte d'Or, avec l'objectif de trouver des solutions qui permettent de gérer le vulpin, sans recours aux herbicides et sans accroître les impacts environnementaux et opérationnels.

### Abstract

The INRA *Weed Biology and Management* research laboratory develops models simulating weed dynamics in cultivated fields as a function of cumulative cropping system effects. These models are tools for analysing interactions in the agro-system, for analysing the diversity in species behaviour, and for evaluating alternative management strategies that are proposed to address current issues in agriculture (e.g. to reduce the dependence on herbicides). To date, two model versions have been developed, a monospecific prototype for black-grass (ALOMYSYS), followed by a generic and multispecific update (FLORSYS). Both are based on the annual weed life-cycle and on demographic functions depending on cropping systems, in interaction with climate and environmental conditions. Taking account of interactions requires the decomposition of the system into individual processes. In the multi-specific version, the species diversity is integrated by functional relationships. Each species is represented by a combination of traits, and the model parameters are estimated from these easy-to-measure traits (e.g. mean seed mass). A methodology for evaluating cropping systems and for testing prospective scenarios with ALOMYSYS and other indicators was proposed and illustrated with case studies from a farm survey in Côte d'Or. The objective was to identify solutions for managing black-grass, without herbicides and without increasing environmental and operational impacts.

## Introduction

En raison des problèmes environnementaux liés à l'utilisation des herbicides, l'agriculture doit appliquer des modes de production plus respectueux de l'environnement, en particulier moins dépendants des herbicides. Cette préoccupation s'accompagne du maintien de la biodiversité, à laquelle peuvent contribuer des espèces adventices ayant un rôle fonctionnel dans l'agro-écosystème.

Nous avons donc besoin de stratégies innovantes pour la gestion des adventices, prenant en compte l'ensemble du système de culture (succession des cultures dans le temps et itinéraires techniques appliqués à ces cultures selon Sebillotte (1990)) au lieu de raisonner indépendamment chaque technique culturale. Or, les effets des systèmes de culture sur les adventices sont complexes. Ils sont susceptibles d'influencer les différents processus du cycle de vie des espèces (levée, compétition, production semencière...) et les espèces adventices répondent différemment en fonction de leur biologie. Les techniques culturales interagissent entre elles ainsi qu'avec les conditions climatiques. De plus, ces effets se cumulent sur plusieurs années. Par exemple, les semences d'une espèce peuvent être remontées en surface lors d'un labour plusieurs années après leur production et leur enfouissement, occasionnant subitement de nombreuses levées au champ.

Dans ce contexte, la modélisation est indispensable pour synthétiser et quantifier ces effets dans une large gamme de situations, analyser les interactions et évaluer les effets cumulatifs à long terme des systèmes de culture sur les adventices. Nous présentons ici les principes pour développer, évaluer et utiliser de tels modèles pour la gestion intégrée des adventices.

## Modèles des effets des systèmes de culture sur la flore adventice

À ce jour, nous avons développé dans notre unité deux modèles qui synthétisent et quantifient les effets des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice. Tout d'abord, un prototype appelé ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2006b ; Colbach *et al.*, 2007) a été développé pour une espèce fréquente et nuisible, le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*). Ce modèle est fondé sur la représentation du cycle de vie de l'adventice par une succession de stades-clé (ex. semences germées, croissance prélevée, plantules levées...) reliés par des fonctions démographiques dépendant des effets des systèmes de culture, en interaction avec le climat et les états du milieu. Nous travaillons actuellement à l'extrapolation de ce prototype à une flore adventice plurispécifique pour construire le modèle FLORSYS (pour flore et systèmes de culture).

Nous présentons ici quelques principes de modélisation indispensables pour quantifier correctement les effets des systèmes de culture dans une large gamme de situations et paramétrer le modèle pour une flore adventice diversifiée. Le Tableau 1 synthétise les effets majeurs des composantes du système de culture décrits dans le modèle ALOMYSYS:

**Tableau 1 :** Synthèse des effets des systèmes de culture sur les stades du cycle de vie des adventices et des états du milieu dans le modèle ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2006, 2007)

Composante du système de culture	Effet intermédiaire	Effet sur le vulpin
travail du sol (outil, profondeur, date)	structure du sol	la compaction du sol ↗ la mortalité des semences germées et ↘ la levée
	mélange de sol =f(structure du sol)	détermine la profondeur des semences exposition des semences à la lumière stimulation d'une vague de germination destruction de semences germées et plantes levées
culture	choix des techniques culturales	(voir effet des techniques)
date de semis	date du semis combinée au travail du sol	en cas de semis tardif, + de semences auront déjà germé et pourront être détruites par le travail du sol lors du semis, donc moins de levée en culture
	date de levée de la culture	plus l'adventice lève tôt par rapport à la culture, mieux elle survit et se reproduit
densité de semis	densité de la culture	↗ mortalité des plantules ↘ production de semences
herbicides (substance active, dose, niveau d'efficacité, date)		mortalité = f(SA, dose, niveau d'efficacité) mortalité ↘ avec densité et stades des plantes ainsi qu'avec la profondeur des semences ↘ tallage des plantes survivantes
désherbage mécanique (date, vitesse, profondeur)	arrachage des plantes recouvrement de sol	mortalité dépend de : arrachage, recouvrement, humidité du sol
fauche		destruction des talles montées mortalité des plantes si fauche après début maturité ↘ reproduction des plantes survivantes décalage des stades
		↗ fleurs/épi
azote	Conditions (climat, culture...) durant la production de graines	↗ dormance des semences produites
Récolte		destruction de toutes les plantes
		addition des nouvelles semences au stock du sol

X↗(↘)Y : si x augmente, y augmente (diminue).

### Variables d'entrée et de sortie

Les variables d'entrée des modèles ALOMYSYS et FLORSYS sont de trois types :

- le stock semencier initial, décrit par la densité de semences d'adventices dans le sol et leur répartition verticale au sein de l'horizon travaillé (de 0 à 30 cm de profondeur).
- les composantes des systèmes de culture. Il s'agit de la succession culturale et des modalités de leur gestion, comprenant les opérations de travail du sol (date, outil, caractéristiques), l'implantation de la culture (variété, date, densité, inter-rang), les traitements herbicides (date, substance active, conditions), le désherbage mécanique (date, outil, profondeur, vitesse), les engrais azotés chimiques et/ou organiques (date, quantité), le broyage ou la fauche, et la récolte (date).
- l'environnement pédo-climatique : température, pluviométrie et ETP quotidiennes, ainsi que la texture et les conditions hydro-thermiques du sol. Les variables hydro-thermiques du sol peuvent

être soit introduites directement par l'utilisateur, soit prédites à l'aide de modèles existants (STICS : Brisson *et al.*, 1998).

En sortie, le modèle calcule quotidiennement la densité d'individus de chaque espèce à chaque stade de développement (plantule, stade végétatif, floraison, *etc.*) ainsi que le stock semencier viable dans le sol.

### *Décomposition du cycle de vie en processus*

Pour comprendre et quantifier la variabilité des réponses observées au champ, sans risque de confusion d'effets, il est nécessaire de décomposer les effets de la technique sur les états du milieu et les processus de base dont la succession détermine le comportement des populations adventices.

Appliqué à l'effet du travail du sol sur la levée des adventices (Figure 1), ce principe revient à modéliser :

- les effets du travail du sol sur les états et conditions physiques du sol (structure, température, humidité, lumière...)
- les effets du travail du sol sur la localisation des semences d'adventices, et
- les effets des conditions physiques et de la localisation des semences sur la survie, dormance, germination et croissance-pré-levée des adventices.

Le stock semencier, qui décroît chaque jour suite aux attaques parasitaires ou par simple vieillissement, est composé de semences dormantes (qui ne germent pas même en conditions favorables) et non dormantes. Les proportions de semences dormantes varient en fonction des saisons. Les semences non dormantes peuvent germer (sortie de la radicule de la semence) si elles sont proches de la surface du sol et si le sol est suffisamment chaud et humide. Une fois germées, les semences produisent un hypocotyle (cas des dicotylédones) ou un épicotyle puis une feuille (cas des monocotylédones). Lorsque cet organe sort de la terre, la plantule est considérée comme levée. Cependant, si les semences sont enfouies trop profondément, ou si l'organe aérien est bloqué par des mottes de terre ou si le sol s'assèche après germination et que la radicule est trop courte pour atteindre les horizons sous-jacents plus humide, la plantule meurt sans lever.

Le travail du sol joue à différents niveaux : il peut enfouir ou remonter des semences, il peut contribuer à lever les dormances des semences et stimule leur germination si le sol est humide au moment du travail, et il est un des facteurs déterminants de la structure du sol. En fonction de l'histoire culturale (déterminant, entre autres, la localisation et la densité des semences adventices) et de l'humidité au moment du travail, l'effet d'un même outil sera donc très différent (Figure 2).

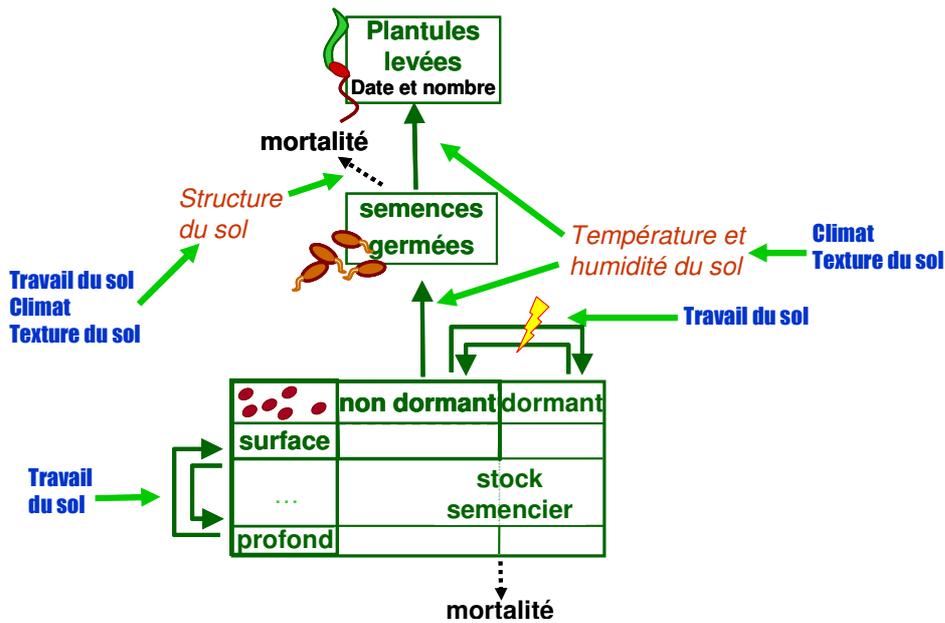


Figure 1 : Décomposition de l'effet du travail du sol sur la levée des adventices en processus biologiques élémentaires, en interaction avec les variables d'entrée (ex. **Travail du sol**) et états intermédiaires (ex. *Structure du sol*) (Colbach et al., 2006b)

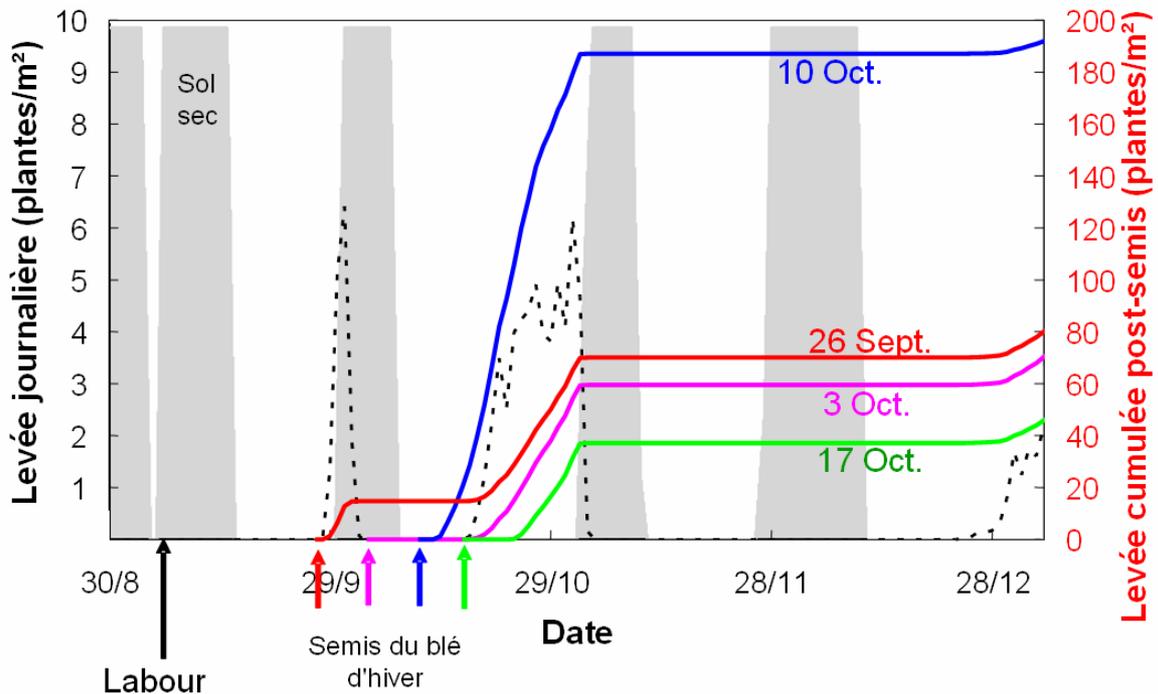
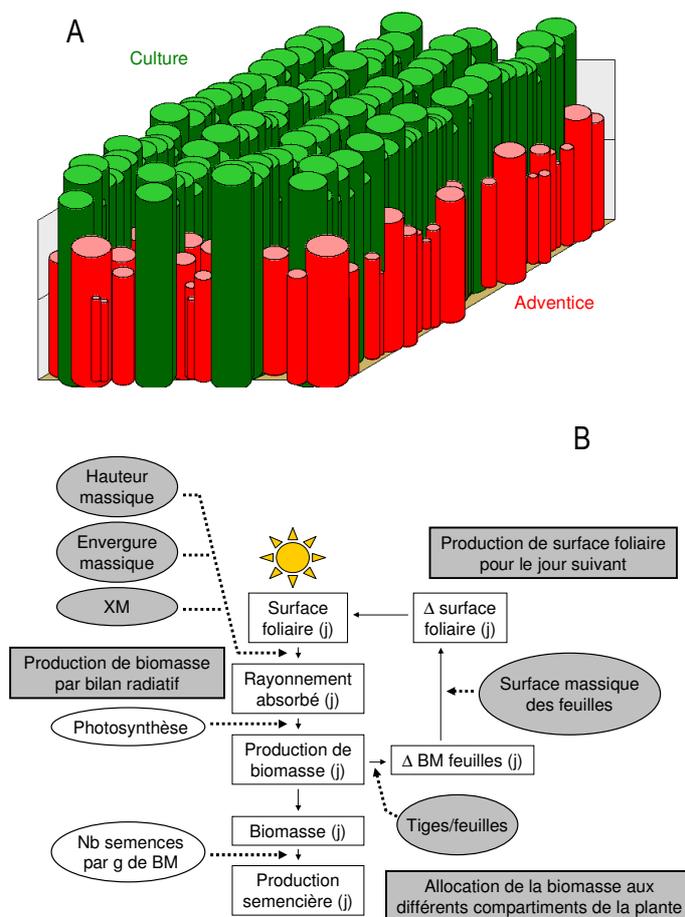


Figure 2 : Effet d'un retard du semis d'un blé d'hiver sur la levée du vulpin en culture simulée par ALOMYSYS. Le semis retardé laisse plus de temps aux semences adventices pour germer avant le semis, réduisant ainsi le nombre de semences adventices pouvant lever en culture. Si le travail du sol associé au semis est réalisé lors de la réhumidification du sol (semis du 10 octobre), il stimule une vague de levée post-semis

### Modèle de compétition et le micro-climat lumineux

Une fois levée, les plantules se retrouvent dans un environnement lumineux très variable, en fonction de l'emplacement et de la taille des plantes déjà en place. La production semencière (et donc le renouvellement du stock semencier) de chaque plante d'une espèce peut varier fortement en fonction de la densité de la culture et de la variété ainsi que du climat. La simulation de cette production nécessite donc un modèle dynamique rendant compte de la mise en place progressive des relations de concurrence dans le couvert plurispécifique (Figure 3). Ce module intègre les deux éléments suivants :

- l'hétérogénéité entre plantes, avec de nombreuses petites plantes qui contribuent peu à la production semencière et quelques gros individus qui y contribuent beaucoup. FLORSYS intègre une représentation de la répartition spatiale des individus dans le couvert ; cette répartition détermine un microclimat lumineux hétérogène (adapté de Chave, 1999). Le devenir de chaque individu peut être simulé en fonction de son environnement lumineux, ce qui permet de rendre compte des effets des dates de levée relatives des individus mais aussi de la structure du peuplement cultivé, des écartements entre les rangs, de la régularité de l'implantation...
- la réponse des plantes adventices à leur environnement lumineux par des modifications morphologiques (étiolement, modifications de la masse surfacique des feuilles, ...) qui leur permettent de s'adapter à l'intense compétition pour la lumière (Cavero *et al.*, 2000). Ces adaptations sont simulées par des fonctions de plasticité morphologique (Figure 3).



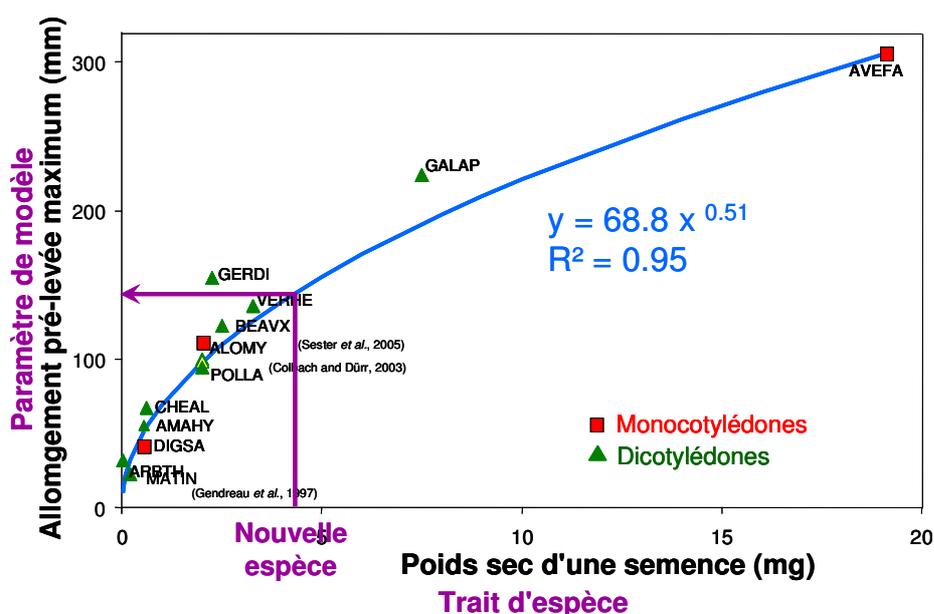
**Figure 3 :** A) Représentation schématique en 3D des plantes cultivées et adventices dans un champ et B) ensemble des processus déterminant la morphologie des plantes, la quantité de rayonnement absorbé et l'accumulation de biomasse (BM). Les variables Hauteur massique (Hauteur/biomasse), Envergure massique (envergure/biomasse), XM (paramètre de répartition en hauteur de la surface foliaire), Surface massique des feuilles et Tige/feuille (rapport de biomasse entre ces deux types d'organes) sont des variables morphologiques déterminées par l'environnement lumineux des plantes et qui déterminent elles-mêmes l'interception du rayonnement par chaque individu en compétition.

### Paramétrage à l'aide de traits caractérisant les espèces

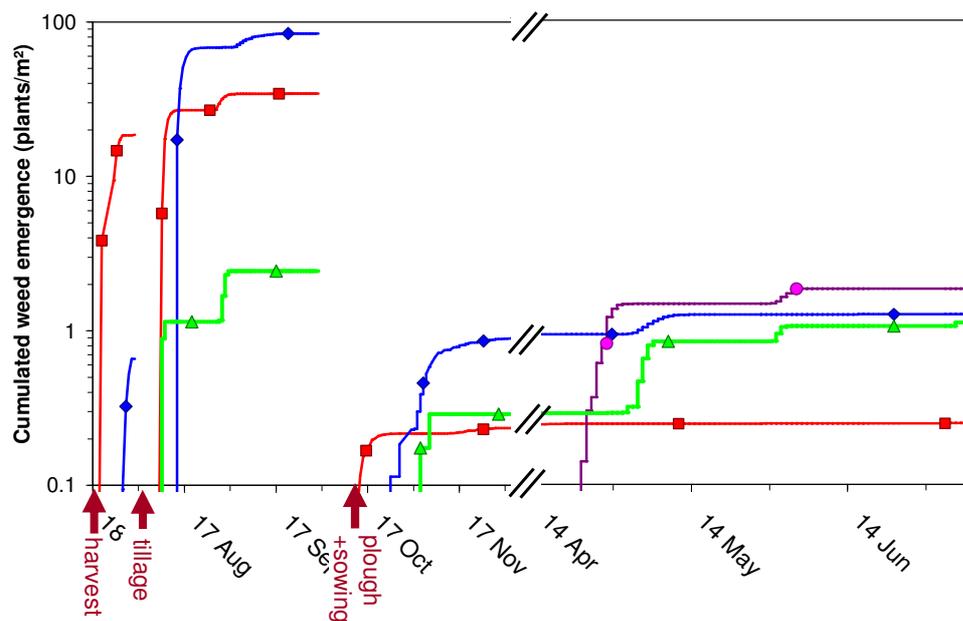
Les modèles ALOMYSYS et FLORSYS nécessitent un nombre important de paramètres pour décrire la réponse de chaque espèce adventice aux systèmes de culture. Il est impossible d'estimer les valeurs de tous ces paramètres pour chaque nouvelle espèce à rajouter au modèle. C'est pourquoi nous avons choisi une approche innovante, adaptée de l'écologie fonctionnelle, qui consiste à estimer les paramètres du modèle à partir de traits faciles à mesurer, permettant de caractériser et discriminer les espèces :

- identification d'un ou plusieurs traits pertinents (ex. masse des semences) pour chaque paramètre du modèle (ex. allongement maximal de l'hypocotyle avant levée),
- choix et étude expérimentale d'une série d'espèces contrastées et représentatives de la gamme de variabilité du paramètre et des traits,
- ajustement de régressions aux résultats expérimentaux et introduction dans FLORSYS (Figure 4),
- estimation automatique du paramètre du modèle pour chaque nouvelle espèce ajoutée à partir du trait mesuré.

Ce principe nous permet alors de simuler rapidement le comportement d'espèces très diverses à partir de quelques traits (Figure 5). La matricaire (*Matricaria perforata*), espèce à faible dormance et à faible potentiel hydrique de base pour la germination, germe rapidement après la récolte du précédent. Ainsi, il reste peu de semences survivantes pouvant germer après le semis de la culture. La germination estivale du brome (*Bromus sterilis*) est retardée parce qu'il germe difficilement à la lumière et a besoin d'être enfoui (même superficiellement) pour faciliter sa germination. En revanche, à la fin de l'interculture, la quasi-totalité des semences a déjà germé et il ne reste presque plus de semences à lever après le semis de la culture. L'amarante (*Amaranthus hybridus*), avec une dormance estivale et sa température de base élevée, germe peu en été. La levée ne devient importante que début mai. Cependant, elle reste assez faible puisque la majorité des semences a été enfouie trop profondément pour lever en culture. Enfin, la renouée à feuille de patience (*Polygonum lapathifolium*), dormante en automne, lève au printemps; cependant, elle est capable de lever plus précocement que l'amarante parce que ses exigences en température pour la germination sont plus faibles.



**Figure 4.** Estimation d'un paramètre de FLORSYS à partir d'un trait facile à mesurer. Exemple de l'estimation de l'allongement maximal pré-levée de l'hypocotyle à partir de la masse des semences (adapté à partir de Gardarin et al., soumis)



**Figure 5** . Simulation à l'aide de FLORSYS de la levée de quatre espèces adventices dans une parcelle récoltée début juillet, déchaumée début août, puis labourée et semée en début octobre (*Matricaria perforata* : ■ - faible dormance, MS (masse d'une semence) = 0.27 mg, T°Cbbase (température de base de germination) : 1.96°C, PHbase (potentiel hydrique de base) = -0.75 MPa; *Bromus sterilis* : ◆ - faible dormance, MS = 7.38 mg, T°Cbbase = 1.96°C, PHbase = -0.75 MPa; *Polygonum lapathifolium* : ● - dormance automnale, MS = 2.04 mg, T°Cbbase = 5.84°C, PHbase = -1.55 MPa; *Amaranthus hybridus* : ▲ dormance estivale, MS = 0.38 mg, T°Cbbase = 8.8°C, PHbase = -0.95 MPa).

## Évaluation de modèles

Avant d'utiliser ces modèles pour la conception de systèmes de culture, il est indispensable de les évaluer.

Certaines étapes sont un peu techniques, comme les vérifications techniques du programme informatique des modèles. L'analyse de sensibilité aux variables d'entrée permet d'identifier les variables de l'histoire culturale à renseigner lors des enquêtes en exploitations agricoles pour produire des simulations de bonne qualité. Vient ensuite la comparaison de simulations des modèles à des observations indépendantes de terrain afin d'identifier le domaine de validité du modèle, son erreur de prédiction et les éventuels défauts à corriger dans le futur.

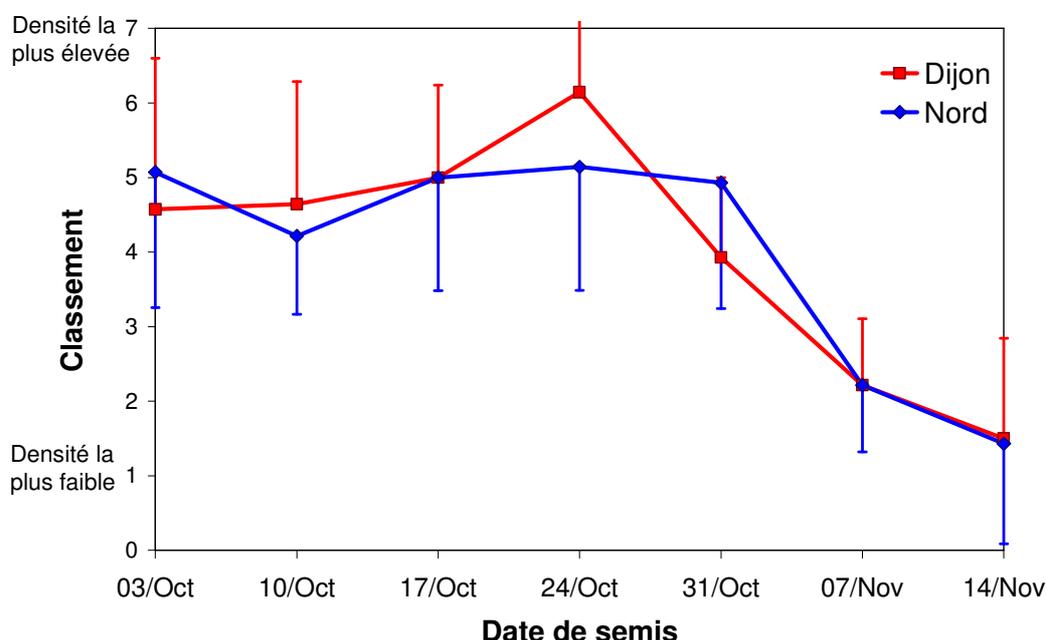
La prédiction de la levée, stade critique du modèle ALOMYSYS, a ainsi été évaluée à l'aide d'essais spécifiques combinant les facteurs pertinents influençant les processus de dormance, germination et levée (date et profondeur d'enfouissement et remontée des semences, pluie estivale, structure du sol). Des mesures hebdomadaires ont été réalisées pour suivre les états intermédiaires de l'adventice et du milieu. Cette première évaluation a montré que le modèle prédit correctement les dates et amplitudes des vagues de levée mais surestime la survie des semences de vulpin proches de la surface dans les situations sans travail du sol pendant plus d'un an (Colbach et al., 2006a). Le comportement pluriannuel du modèle et sa capacité à discriminer des systèmes de culture ont été évalués sur un essai "système de culture" existant (Chauvel et al., 2001). Cet essai combinait les éléments majeurs des systèmes de culture (rotation, travail du sol, dates et densités de semis, apports d'azote) et a duré de 1996 à 2004, avec deux à trois notations des infestations de vulpin par an. Cette deuxième évaluation a montré que le modèle classe correctement les systèmes de culture en fonction de leur infestation par le vulpin et prédit bien l'ampleur des infestations (Colbach et al., 2007).

Des expérimentations similaires sont actuellement en cours pour évaluer le modèle FLORSYS.

## Utilisation de modèles pour la conception de systèmes de culture

### *Optimisation d'une technique culturale*

Grâce à son pas de temps journalier et la prise en compte des interactions avec le milieu, ces modèles permettent d'optimiser le choix de techniques culturales, en fonction de l'histoire culturale et du milieu. Afin de prendre en compte les interactions avec le climat, les scénarios testés doivent être simulés avec différentes séries climatiques. Ainsi, un retard de semis du blé d'hiver réduit l'infestation de la culture par le vulpin mais que cette réduction n'est systématique que pour les semis après le 24 octobre (Figure 6). Début octobre, un retard de semis peut même occasionnellement augmenter la levée de l'adventice lorsque le travail du sol associé au semis est réalisé pendant la réhumectation du sol. La réduction de l'infestation par un retard de semis n'est systématique que dans des climats où le sol est continuellement humide.



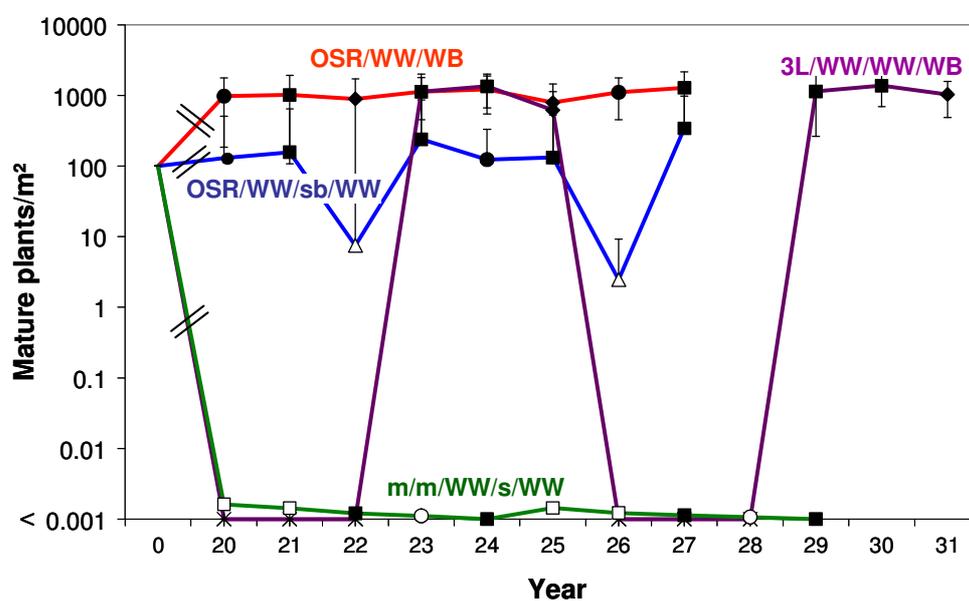
**Figure 6 :** Exemple d'évaluation d'une technique culturale. Effet d'un retard d'une semaine du semis d'un blé d'hiver sur la levée du vulpin en culture. Moyenne de classements des dates de semis sur 14 répétitions climatiques simulées avec ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2008)

### *Recherche de solutions adaptés à des systèmes de culture contrastés*

L'effet des techniques culturales ne dépend pas seulement des états du milieu mais aussi de l'histoire culturale. Par ailleurs, les solutions doivent être compatibles avec les objectifs et contraintes des systèmes de culture et des exploitations dans lesquels elles vont être mises en œuvre. Nous avons donc effectué des enquêtes chez des agriculteurs en Côte d'Or, en choisissant des exploitations représentatives de la variabilité locale (plateau vs. plaine, avec ou sans élevage, présence de culture de betterave...). Seize exploitations ont été enquêtées afin de collecter les variables d'entrée nécessaires pour utiliser ALOMYSYS. De plus, nous avons aussi posé des questions plus générales sur les objectifs et contraintes (équipements, localisation des parcelles, etc.) des exploitants afin d'orienter le choix des scénarios à tester.

À partir de ces données, nous avons établi une typologie de rotations culturales contrastées que nous avons évaluées à l'aide d'ALOMYSYS pour le risque malherbologique (Figure 7). Ces simulations montrent que l'infestation par le vulpin est la plus importante dans la rotation colza/blé/orge, composée entièrement de cultures d'hiver. La rotation colza/blé/betterave/blé est très proche de la précédente, mais l'introduction d'une culture de printemps, la betterave sucrière, a permis de diviser le niveau d'infestation par dix parce que le vulpin lève et se multiplie difficilement dans une culture de printemps. La troisième rotation, maïs/maïs/blé/soja/blé, comporte trois cultures de printemps sur cinq, ce qui explique son très faible niveau d'infestation par le vulpin. La dernière rotation est constituée d'une prairie temporaire de trois ans de luzerne, suivie de trois années de céréales d'hiver. Bien que le vulpin ne produise aucune semence pendant la prairie temporaire, l'infestation des céréales d'hiver suivantes est aussi élevée que dans la rotation composée uniquement de cultures d'hiver ; la raison en est l'absence de travail du sol pendant les trois ans de luzerne. En effet, le travail du sol estival est indispensable pour stimuler des germinations de semences de vulpin et vider ainsi le stock semencier, la mortalité "naturelle" des semences n'étant pas suffisante.

L'évaluation ne s'est pas restreinte au seul risque malherbologique. Le risque environnemental associé aux herbicides a été estimé à l'aide de l'indicateur I-PEST (van der Werf et Zimmer, 1998), montrant que la rotation avec l'impact le plus faible, maïs/maïs/blé/soja/blé, est aussi celle la moins infestée par le vulpin. Ceci indique qu'il y a des solutions pour gérer le vulpin sans avoir nécessairement recours à des herbicides présentant des risques pour l'environnement. Cependant, l'analyse du nombre de passages indique un autre coût car la rotation maïs/maïs/blé/soja/blé est celle dont le nombre de passages est le plus élevé, notamment en passages coûteux comme le labour et le désherbage mécanique.

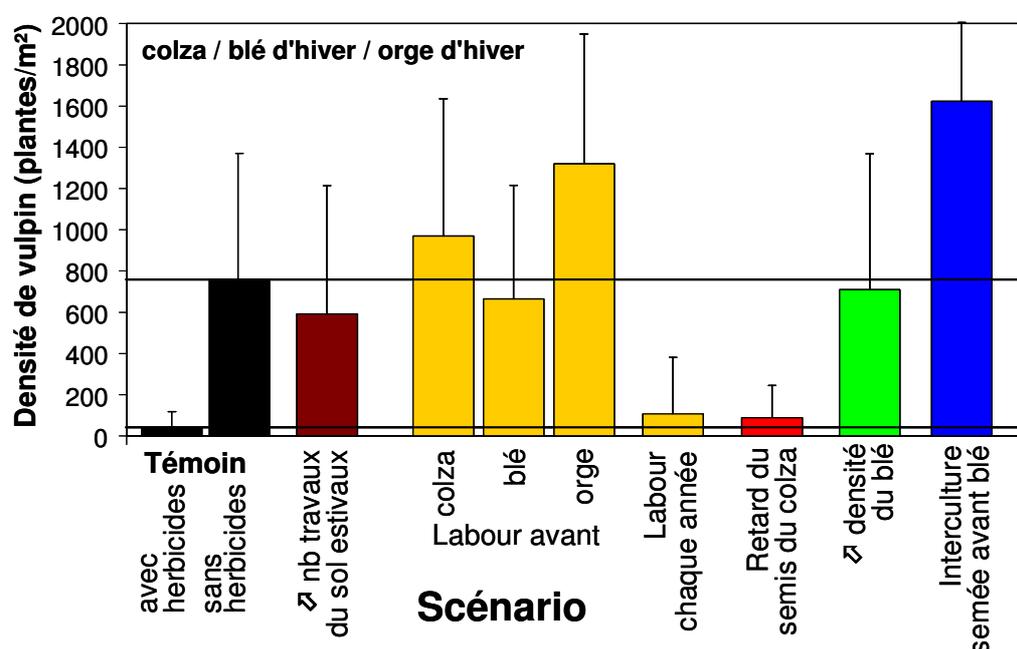


**Figure 7 :** Infestation de quatre rotations culturales par le vulpin simulée à l'aide du modèle ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2008). Moyenne de 10 répétitions avec des séries climatiques randomisées. ● : OSR = colza, ■ : WW = blé d'hiver, ◆ : WB = orge d'hiver, ▲ : sb = betterave sucrière, ○ s = soja, \* : 3L = 3 ans de luzerne, □ : m = maïs.

**Tableau 2** : Évaluation environnementale et opérationnelle des rotations culturales analysées (moyennes par culture et par rotation) (Colbach *et al.*, 2008).

Rotation	Toxicité des herbicides (I-PEST)#	Nombre d'opérations				
		Total	Herbicides	Labour	Autres travaux du sol	Désherbage mécanique
colza/blé/orge	0.27	5.00	1.33	0	3.67	0.0
colza/blé/betterave/blé	0.55	6.25	2.25	0.25	3.75	0.0
maïs/maïs/blé/soja/blé	0.15	6.40	2.20	1.00	2.80	0.4
3luzerne/blé/blé/orge	0.25	3.50	2.00	0	1.50	0.0

# Plus cet indicateur est élevé, plus les herbicides présentent un risque environnemental élevé.



**Figure 8** : Test de scénarios de gestion de vulpin sans herbicides à l'aide du modèle ALOMYSYS pour la rotation colza d'hiver/blé d'hiver/orge d'hiver (Colbach *et al.*, 2008). Moyenne de 10 répétitions avec des séries climatiques randomisées.

Dans un deuxième temps, ALOMYSYS et les autres indicateurs ont été utilisés pour tester des scénarii pour chaque rotation, avec l'objectif de trouver des solutions qui permettent de gérer le vulpin, sans avoir recours aux herbicides et sans accroître les impacts environnementaux et opérationnels. L'avantage des simulations est de pouvoir tester une large gamme de modifications dans les systèmes de culture en combinaison avec différentes séries climatiques et de les comparer à deux témoins correspondant à la situation actuelle, avec ou sans applications d'herbicides (Figure 8). L'objectif est alors de réduire l'infestation par le vulpin en-dessous du témoin sans herbicides et de se rapprocher autant que possible du témoin avec applications d'herbicides.

Ces simulations préliminaires montrent ainsi qu'une augmentation de la fréquence du travail du sol superficiel estival permet d'améliorer la maîtrise de l'infestation. Le labour vise à enfouir les semences de vulpin profondément pour empêcher leur levée en culture. Cependant, les simulations montrent que l'effet de cette technique dépend de la culture suivante. Par contre, si le labour est pratiqué dans une rotation constituée exclusivement de cultures d'hiver, il est très efficace (le résultat dépend des

rotations). De même, retarder le semis du colza laisse plus de temps au vulpin de germer en été (réduisant ainsi la quantité de semences pouvant lever en culture). Augmenter la densité des cultures pour étouffer cette adventice est peu efficace tandis que l'introduction d'un couvert d'interculture avant le semis du blé favorise le développement de l'infestation de vulpin. En effet, cette stratégie ne laisse plus assez de temps pour effectuer des travaux du sol estivaux et stimuler ainsi des germinations pré-semis.

## Conclusion

Les modèles de simulation du comportement démographique des populations et communautés adventices présentés dans cet article sont originaux, à l'échelle mondiale, par le fait qu'ils prétendent simuler les systèmes de culture dans leur complexité et leur diversité, avec un pas de temps fin permettant d'intégrer les interactions avec le climat et les décisions de l'agriculteur. A l'heure actuelle, nous disposons d'une version monospécifique 'vulpin' (ALOMYSYS) validée, ainsi qu'une version plurispécifique (FLORSYS) non encore validée, et qui reste encore largement à paramétrer pour intégrer la diversité des espèces. Cette version peut cependant d'ores et déjà être utilisée par des utilisateurs avertis, capable d'approximer des jeux de paramètres sur la base d'une expertise de terrain, ou intéressés par des simulations impliquant des espèces virtuelles.

Ces modèles sont utilisables par la recherche et le développement agricole, soit pour évaluer *ex ante* des propositions de systèmes de culture alternatifs, soit pour identifier des règles de décision pour le pilotage de systèmes de culture relevant de la Protection Intégrée contre les adventices, soit encore pour étudier des scénarios alternatifs pour résoudre des problèmes ponctuels de maîtrise de telle ou telle espèce. Le paramétrage et l'évaluation du modèle FLORSYS restent cependant des enjeux importants à traiter pour que le modèle puisse devenir un outil de raisonnement complètement opérationnel.

Les simulations présentés dans cet article pour le vulpin montrent qu'il existe des stratégies de gestion de cette espèce efficaces avec peu ou pas d'herbicides, mais qu'aucune technique individuelle n'est aussi efficace que les herbicides seuls. La Protection Intégrée nécessite donc de combiner différentes solutions pour pouvoir proposer des solutions innovantes adaptées à chacune des situations agricoles. Ces combinaisons de solutions doivent être évaluées pour la faisabilité dans les exploitations d'un point de vue de l'organisation du travail et des coûts engagés, tant économiques qu'environnementaux. Les stratégies proposées doivent prendre en compte d'autres critères d'évaluation, comme le risque d'émission de gaz à effet de serre ou l'apparition d'autres bioagresseurs. Un objectif à court terme est d'étendre l'évaluation actuelle de système de culture pour prendre en compte l'ensemble de la flore adventice, ce qui sera possible dès l'achèvement du modèle plurispécifique FLORSYS.

## Références bibliographiques

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J. M., Meynard J. M., Delecolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.

Cavero J., Zaragoza C., Bastiaans L., Suso M. L., Pardo A., 2000. The relevance of morphological plasticity in the simulation of competition between maize and *Datura stramonium*. *Weed Research* 40, 163-180.

Chauvel B., Guillemin J. P., Colbach N., Gasquez J., 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection* 20, 127-137.

- Chave J., 1999. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. *Ecological modelling* 124, 233-254.
- Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C., Caneill J., 2006a. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - II. Evaluation. *European Journal of Agronomy* 24, 113-128.
- Colbach N., Chauvel B., Gauvrit C., Munier-Jolain N. M., 2007. Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: From seedling to seed production. *Ecological Modelling* 201, 283-300.
- Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2006b. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24, 95-112.
- Colbach N., Sassi A., Granger S., 2008. ALOMYSYS: a model for evaluating and developing cropping systems for integrated weed management. *In: 10th congress of the European Society for Agronomy, Bologne (Italie)*
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., soumis. Effects of seed depth and soil structure on the emergence of weeds with contrasted seed traits. *Journal of Experimental Botany*.
- Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *In: L. Combe, D. Picard, (eds) Les systèmes de culture, INRA, Paris, p.165-196*
- van der Werf H. M. G., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225-2249.

## Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures.

N. Munier-Jolain<sup>1</sup>, V. Deytieux<sup>2</sup>, J.P. Guillemain<sup>1</sup>, S. Granger<sup>1</sup>, S. Gaba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: UMR INRA-UB-ENESAD 1210 Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, F-21065 Dijon cedex

<sup>2</sup>: INRA, Réseau PIC, UE Domaine Expérimental d'Epoisses, 17 rue Sully, F-21065 Dijon cedex

Correspondance : munierj@dijon.inra.fr

### Résumé

La Protection Intégrée (PI) contre la flore adventice repose sur des combinaisons de techniques culturales visant à limiter le potentiel d'infestation des adventices dans les cultures en réduisant l'usage de traitements herbicides. Cet article présente le dispositif d'une expérimentation de longue durée visant à tester les performances de prototypes de systèmes de culture conçus selon les principes de PI. Les principales règles de décision sont présentées, en lien avec les connaissances disponibles sur la biologie des espèces adventices. Les résultats obtenus au cours des 6 premières années de l'essai indiquent que ces principes de PI permettent de maîtriser de façon satisfaisante les infestations tout en réduisant de façon importante la dépendance aux herbicides et les impacts environnementaux associés. Les aspects socio-économiques de l'évolution des systèmes de culture vers la PI sont également discutés.

### Abstract

Integrated Weed Management (IWM) is based on the combination of management techniques aiming at reducing the potential for weed infestations during crop cycles, in order to reduce the use of herbicide. This paper presents a long term experiment conducted to assess the performances of cropping system prototypes designed according to IWM principles. The main decision rules are presented, along with their connexions with the available knowledge about weed biology. The results from the first six years show that IWM make it possible to control weeds with a low reliance on herbicides and reduced associated environmental impacts. Socio-economic aspects of modifying cropping systems toward IWM are also discussed.

---

### Introduction

#### *La protection intégrée (PI)*

Les nouveaux enjeux environnementaux (réduction des pollutions diffuses, restauration de la biodiversité) fixés par les politiques agricoles (ex. réformes de la PAC) et/ou le Grenelle de l'Environnement conduisent à repenser les pratiques agricoles actuelles vers une agriculture moins dépendante de la lutte chimique. En parallèle, les enjeux de l'alimentation mondiale amènent à replacer la productivité au cœur des objectifs de l'agriculture. Ces nouveaux enjeux imposent de considérer l'ensemble des moyens possibles pour limiter l'impact des bioagresseurs des cultures tout en optimisant la production, en respectant l'environnement, en assurant la viabilité économique et en tenant compte de l'acceptabilité sociale par les acteurs.

La protection intégrée (PI) est définie comme étant un « système de lutte aménagée qui, compte tenu du milieu particulier et de la dynamique des populations des espèces considérées, utilise les techniques et méthodes appropriées de façon aussi compatible que possible en vue de maintenir les populations d'organismes nuisibles à des niveaux où ils ne causent pas de dommages économiques » (Milaire 1995). Il s'agit par conséquent d'employer les moyens de gestion valorisant les régulations physiques et biologiques pour maîtriser les infestations de bioagresseurs en agissant à différentes étapes de leur cycle de vie. Pour ce faire, la PI des cultures associe un ensemble de leviers aux effets complémentaires permettant d'empêcher le bon déroulement du cycle de vie des bioagresseurs. Il en résulte des systèmes de cultures qui combinent plusieurs techniques à effet partiel parmi lesquelles peut figurer un usage raisonné de xénobiotiques. Selon le cadre d'analyse du modèle ESR (Efficience, Substitution et Re-conception) proposé par Hill et MacRae (1995) et repris par Bellon *et al.* (2007), l'évolution des systèmes agricoles vers la PI peut mobiliser des adaptations visant (i) à améliorer l'Efficience des méthodes de lutte, (ii) à Substituer une technique de lutte par une autre (typiquement substitution d'un traitement chimique par une technique de lutte biologique ou mécanique), ou (iii) à Reconfigurer l'ensemble du système de culture. L'amélioration de l'efficience des méthodes de lutte chimique ne relève pas à proprement parler de la PI dans la mesure où elle ne mobilise en général pas les effets de régulation physique ou biologique des populations de bioagresseurs. La substitution d'une technique de lutte chimique par une solution alternative génétique ou biologique, lorsqu'elle existe, permet de remplir l'objectif de réduction d'usage des pesticides, mais sera le plus souvent confrontée à des problèmes de durabilité si la résistance de la variété utilisée est contournée ou si l'efficacité de la technique non chimique est insuffisante, ce qui conduirait à une augmentation plus ou moins rapide du niveau des infestations des bioagresseurs. La PI nécessitera donc le plus souvent d'envisager la re-conception du système, afin de lui assurer une nouvelle cohérence d'ensemble. Cette caractéristique de la PI justifie les recherches mobilisant des approches systémiques, éventuellement complémentaires d'études plus détaillées des processus individuels (par exemple : effet du travail du sol sur une espèce donnée).

Le rendement, la qualité des produits récoltés et les indicateurs économiques liés au revenu des agriculteurs sont des critères d'évaluation traditionnels des systèmes de culture. Ces critères restent pertinents pour les systèmes de PI, mais ne sont pas suffisants. L'évaluation de la performance des systèmes par rapport aux objectifs fixés nécessite de considérer en complément :

- des critères de dépendance aux pesticides (indicateurs du type IFT, Indice de Fréquence de Traitement) ;
- des critères liés aux impacts sur la santé humaine ;
- des critères liés aux impacts environnementaux : risques associés aux transferts de pesticides dans l'environnement (indicateurs du type I-Phy, Bockstaller *et al.*, 1997 ; Bockstaller *et al.*, 2006), contribution à l'eutrophisation des milieux, à la production de gaz à effet de serre ;
- voire des critères liés au bilan énergétique des cultures.

Par ailleurs, l'évaluation de la performance en termes de maîtrise des bioagresseurs est évidemment un élément important de l'évaluation des systèmes de culture proposés.

### *La Protection Intégrée contre les adventices*

Au sein de la parcelle cultivée, la flore adventice (ensemble de la végétation herbacée cohabitant avec l'espèce cultivée) est généralement considérée comme nuisible du fait (i) de la compétition directe qu'elle exerce sur la culture pour les ressources (eau, lumière, éléments minéraux) à l'origine de pertes de rendement (Sen, 1988 ; Aubertot *et al.*, 2006) et (ii) de son rôle de réservoir pour certains bio-agresseurs (champignons, ravageurs) (Edwards, 2004). Du fait de l'étendue de la gamme d'herbicides

disponibles, de leur efficacité sur la quasi-totalité des espèces adventices et de leur facilité d'utilisation, la lutte contre les plantes adventices est aujourd'hui quasi-exclusivement fondée sur l'application d'herbicides. La PI est l'occasion de reconsidérer les effets des techniques culturales sur la flore adventice. Elle repose sur des combinaisons de techniques visant (i) à réduire le potentiel d'infestation (stock semencier superficiel), (ii) à esquiver les périodes de levée préférentielles des espèces présentes, (iii) à détruire les plantules levées au cours du cycle cultural, notamment par le désherbage mécanique, et (iv) à limiter la croissance des adventices, d'une part pour réduire la compétition vis à vis de la culture et donc les pertes de rendement, d'autre part pour restreindre la production semencière et le ré-alimentation du stock. L'ensemble doit permettre de limiter la dépendance aux herbicides. Prises individuellement, les techniques concernées ne permettent pas d'égaliser le niveau d'efficacité des herbicides (Tableau 1), de sorte que la simple substitution n'est pas envisageable. Il faut combiner les techniques affectant la démographie des communautés adventices dans un système de culture cohérent et bien connaître les interactions entre techniques pour valoriser d'éventuelles synergies.

Cette communication repose sur une expérimentation de longue durée portant sur des prototypes de systèmes de culture conçus selon les principes de la PI contre la flore adventice. L'article présente succinctement la méthodologie de ce type d'expérimentation systémique, les règles de décisions constituant les systèmes testés et les liens entre ces règles et les connaissances disponibles, ainsi que les résultats de l'évaluation des performances des systèmes testés à l'échelle d'une rotation (6 ans).

**Tableau 1** : Efficacités approximatives des différentes techniques culturales alternatives et comparaison avec l'efficacité attendue d'un herbicide

Techniques	Herbicides	Désherbage mécanique	Faux-semis	Densité de semis, écartement	Variétés compétitives	Culture de printemps dans une rotation type hiver
Efficacité	~ 98 %	47-61 %	56-72 %*	~ 75 %**	~ 75 %	20-96 %**

\* Kurstjens & Kropff, 2001

\*\* brochure 'Des parcelles plus propres avec moins d'herbicides' éditée par AgroTransfert Picardie

### Expérimentation systémique : aspects méthodologiques

La méthodologie expérimentale utilisée pour la conception-évaluation de systèmes de culture est très différente de l'expérimentation factorielle classiquement utilisée en agronomie (Reau *et al.*, 1996 ; Nolot et Debaeke, 2003 ; Lançon *et al.*, 2007). La première étape consiste à définir les systèmes de culture en fonction des enjeux identifiés en termes d'objectifs, de contraintes, de grandes stratégies de gestion. Au cours de la deuxième étape, on définit des corps de règles de décisions susceptibles d'atteindre les objectifs fixés, sur la base des connaissances disponibles, de simulations avec des modèles, voire d'expertise, en veillant à la cohérence d'ensemble de ces règles. Puis, les corps de règles de décision sont mis en œuvre sur le terrain et des observations et des mesures sont réalisées afin de permettre d'évaluer les performances des systèmes et la pertinence des principes agronomiques sous-tendant les règles de décision. L'évaluation peut porter sur les performances d'ensemble du système de culture ou sur les règles de décision individuelles. En théorie, le prototypage de systèmes de culture prévoit des boucles de progrès, avec des ajustements des règles de décision en fonction des résultats des évaluations. Dans le cas de systèmes de PI contre la flore adventice, l'évaluation porte largement sur l'évolution démographique à long terme de la flore, donc les corps de règles doivent rester suffisamment stables au cours du temps (Debaeke *et al.*, 2008).

## Définition *a priori* des systèmes, dispositif expérimental

L'expérimentation systémique de longue durée de Dijon-Epoisses a été initiée en 2000 (premières récoltes en 2001). Les objectifs sont d'évaluer les performances de systèmes relevant de la PI contre les adventices. L'évaluation porte sur la maîtrise des adventices à long terme et le niveau de dépendance aux herbicides, mais aussi sur les impacts environnementaux, la faisabilité technique et la performance économique. Comme les systèmes de PI reposent largement sur un grand nombre de passages d'outils de travail du sol, que ce soit pour la réalisation de faux-semis ou pour le désherbage mécanique, l'évaluation des systèmes en termes de bilan énergétique et d'émission de gaz à effet de serre est particulièrement importante.

L'essai est situé dans la plaine de Dijon, sur des sols très argileux (35 à 45 % d'argile) à potentiel agronomique plutôt élevé. Le dispositif comporte cinq systèmes de culture : un système de référence SC1, correspondant à un système bourguignon visant à maximiser la rentabilité économique, et quatre systèmes relevant de la PI :

- **SC2 : système de PI sans labour.** Ce système correspond à des exploitations à faible main d'œuvre par hectare minimisant le temps de travail et les interventions à faible débit de chantier. Les systèmes sans labour (TSC, ...) sont très dépendants des herbicides, notamment des anti-graminées. Il est donc intéressant d'évaluer si la PI permet de réduire la dépendance aux herbicides dans ce cadre. Le désherbage mécanique, considéré comme trop consommateur de temps, n'est pas envisagé sur ce système.
- **SC3 : système de PI sans désherbage mécanique.** Ce système ne comporte aucune contrainte en termes de travail du sol. Toutefois, le désherbage mécanique en cours de culture n'est pas envisagé puisqu'il est considéré *a priori* comme fortement consommateur de temps et qu'il nécessite un équipement spécifique. Ce système permet d'évaluer la possibilité d'évoluer vers la PI sans modifier le parc de matériel et sans conséquence lourde sur l'organisation du travail.
- **SC4 : système de PI typique.** Ce système mobilise l'ensemble des moyens agronomiques disponibles pour lutter contre les infestations adventices, y compris le désherbage mécanique et les herbicides en dernier recours si les autres techniques paraissent insuffisantes. Ce système a en outre la spécificité d'intégrer la betterave dans sa rotation, afin d'évaluer la possibilité de réduire la dépendance de cette culture aux herbicides, notamment par l'association de désherbage chimique et mécanique.
- **SC5 : système extrême sans herbicide.** Ce système diffère cependant d'un système biologique puisque la fertilisation repose sur des engrais minéraux et que l'usage d'insecticides, molluscicides et fongicides est autorisé de façon raisonnée.

Le dispositif expérimental comporte deux répétitions des corps de règles de décision de chaque système. Les choix techniques entre les deux répétitions peuvent différer si les états malherbologiques diffèrent. Ceci est d'autant plus probable que les deux parcelles d'un même système ne sont pas cultivées avec la même culture une année donnée (décalage dans la succession de culture). Chaque parcelle est de grande taille (1,7 ha en moyenne) permettant la caractérisation de la flore adventice en tenant compte des hétérogénéités spatiales. La caractérisation de la flore adventice repose sur trois méthodes complémentaires :

- Les mesures de densité de semences dans le sol (stock semencier) à partir de prélèvement de carottes sur une station de 100 m<sup>2</sup> identifiée au moyen de balises magnétiques enfouies. Ces mesures ont été réalisées chaque année au début de l'expérimentation, mais la fréquence des prélèvements a décliné au fil du temps en raison de la lourdeur de la méthode utilisée.
- Des comptages sur « quadrats » (60 x 60 cm) réalisés de deux à quatre fois par an ;

- Des observations visuelles de flore géo-référencées au GPS réalisées au cours d'un arpentage assez exhaustif de la parcelle permettent de réaliser des cartes d'infestation et de suivre la diversité des espèces et l'évolution des tâches en surface et en densité.

## Règles de décision des systèmes de Protection Intégrée

Chaque système de culture testé expérimentalement est associé à un corpus de règles de décision, qui en théorie suffit à piloter l'ensemble du système de culture. Ces règles sont issues, selon les cas, de connaissances d'experts, de simulations avec les modèles disponibles, de résultats expérimentaux. Dans la pratique, il est impossible d'explicitier des règles correspondant à toutes les interventions et adaptées à toutes les situations agronomiques rencontrées, mais les interventions techniques les plus susceptibles d'affecter la démographie des adventices sont soumises à des règles explicites fondées sur la connaissance des interactions entre la biologie des espèces et les systèmes de culture, déterminant les processus de régulation physique et biologique. Nous en donnons ici les principaux exemples :

- **Succession culturale** : Dans les quatre systèmes relevant de la PI, la succession culturale est diversifiée par rapport à la succession colza-blé-orge du système de référence. Cette diversification vise principalement à diversifier les dates de semis – et donc le positionnement des cycles culturaux - à l'échelle de la succession culturale, afin d'éviter de sélectionner les espèces au cycle de développement coïncidant avec un cycle culturel donné. La diversification de la rotation permet donc d'augmenter le temps entre deux générations successives pour une espèce donnée dans l'objectif de réduire sa présence dans le stock de semences en tirant profit de la mortalité naturelle des semences (prédation, dégradation sous l'effet des micro-organismes, épuisement des réserves, germinations n'aboutissant pas à une nouvelle multiplication de semences en raison d'une mortalité de la plante plus ou moins précoce, ...). La persistance des semences dans le sol varie selon les espèces (Barralis *et al.*, 1988) : par exemple les espèces à levée automnale typiques des cultures céréalières (vulpin, gaillet, ...) ont en général des taux de persistance plus faibles que les espèces à levée printanière (chénopode, amarante, ...). Ainsi, pour une espèce à levée automnale, une année sans production semencière entre deux générations successives permettra une diminution du potentiel d'infestation beaucoup plus importante que pour une espèce à levée printanière. Cette constatation justifie des successions culturales diversifiées plus riches en cultures d'automne qu'en culture de printemps. La succession 'type' des systèmes de PI testés sur l'essai correspond à : **colza – céréale d'hiver – culture de printemps – céréale d'hiver – culture d'été – céréale d'hiver**. Les successions culturales sont donc d'une durée de l'ordre de 6 ans. Toutefois, la succession n'est jamais fixée *a priori* et peut être adaptée en fonction des états du milieu, de la flore adventice ou de l'environnement socio-économique. De plus, dans les systèmes permettant l'usage d'herbicides (SC2, 3 et 4), on cherche à alterner tous les 6 ans environ des cultures d'été de graminées (maïs, sorgho) et de dicotylédones (soja, tournesol) pour pouvoir alterner des herbicides à spectre d'action complémentaires tout en se limitant à des herbicides à faible risque environnemental. Enfin, on plante préférentiellement des cultures à bon pouvoir couvrant et adapté aux systèmes. Par exemple le tournesol et le lupin, cultures adaptées au binage, sont cultivés dans les systèmes SC4 et 5.
- **Dates de semis, densité et écartement** : L'esquive des périodes de levée préférentielles des adventices nécessite des adaptations des dates de semis des cultures. En automne, les adventices des céréales lèvent préférentiellement en octobre et de façon limitée en novembre. Les simulations du modèle AlomySys montre que le retard de date de semis de 3 à 4 semaines des céréales permet de réduire le potentiel de levée en début de cycle jusqu'à 90 % (Colbach *et al.*, 2008). La règle pour les semis des céréales d'hiver est donc d'attendre le 25 octobre avant de semer. Par ailleurs, pour maximiser la vitesse de couverture du sol, les densités de semis sont élevées (par

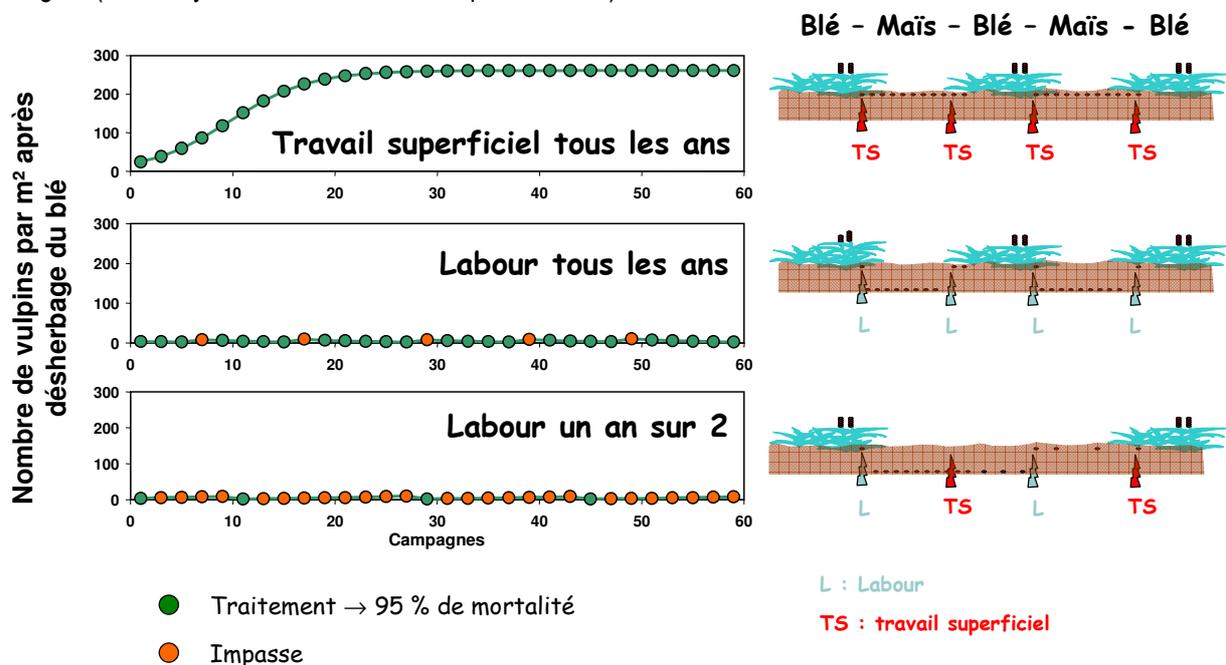
exemple, 400 gr/m<sup>2</sup> pour les céréales), ce qui permet de diminuer la croissance et la production de semences des adventices (Olsen *et al.*, 2005), mais également de compenser les pertes éventuelles liées au désherbage mécanique en systèmes SC4 et 5. Pour les cultures qui ne sont pas binées, l'écartement entre les rangs est réduit autant que possible avec le matériel disponible, ce qui contribue également à maximiser l'aptitude à la concurrence du couvert cultivé (Munier-Jolain, 2001; Olsen *et al.*, 2005).

- **Travail du sol superficiel et faux-semis** : En absence de couvert végétal implanté pendant l'interculture, la stratégie de gestion repose sur des nombreux passages d'outils superficiels visant (i) à détruire les adventices présentes pour éviter la production de nouvelles semences et (ii) à stimuler la germination de semences superficielles non dormantes pour réduire le potentiel d'infestation dans la culture suivante (effet 'faux-semis'). Les passages sont nombreux (un nouveau passage après chaque épisode humide favorisant la germination), mais très superficiels (5 à 8 cm max) afin de ne pas remonter de nouvelles semences des horizons profonds, en particulier juste avant les semis. La fréquence des passages permet de maximiser à la fois les germinations et l'efficacité de destruction des plantules, qui sont d'autant plus fragiles que le travail intervient peu de temps après la levée (voire avant la levée, au stade 'fil blanc').
- **Labour : fréquence et place dans la rotation** : Le labour est un élément important de gestion du stock semencier (cf Colbach *et al.*, 2008). Il permet de gérer la profondeur d'enfouissement des semences d'adventices, alors que celle-ci influence la possibilité de levée, en fonction de l'espèce, de la vigueur de la plantule, elle-même corrélée au poids moyen d'une graine des espèces concernées (Gardarin *et al.*, soumis). Mais l'effet du labour sur la démographie des adventices dépend de la succession culturale (cf Encadré 1). La règle retenue pour l'expérimentation, dans les systèmes de culture en PI autorisant le labour (systèmes SC3, 4 et 5) est d'un labour entre deux cultures potentiellement infestées par la même flore (typiquement entre deux blés).
- **Choix variétal** : De nombreuses études ont démontré les différences d'aptitude à la compétition existant entre variétés d'une même espèce cultivée. Pour le blé, un essai comparatif a été réalisé une année sur des zones non traitées. Un réseau d'essai financé par le FSOV a été conduit sur ce thème en 2006-2007 et 2007-2008. Ces essais ont été pris en compte pour les choix variétaux en blé sur les systèmes en PI, successivement Virtuose et Cézanne. Malheureusement, ces deux variétés présentent des défauts par ailleurs : qualité vis-à-vis de la panification pour l'une et risque de germination sur pied pour l'autre. On ne dispose donc pas pour l'instant de la variété idéale à la fois compétitive et satisfaisant aux exigences de qualité. En colza, l'utilisation d'hybrides permet de valoriser la vigueur initiale de ces variétés, permettant d'atteindre plus facilement des objectifs de couverture du sol en automne au moment des périodes de levée des espèces automnales.
- **Désherbage** : Dans les systèmes de PI (sauf dans le système SC5), l'utilisation d'herbicides est autorisée pour contrôler les populations lorsque la combinaison de toutes les autres techniques mises en œuvre est insuffisante. Des études théoriques ont montré qu'il est inapproprié de chercher à raisonner sur un seuil d'intervention défini pour chaque couple espèce adventice - culture en vue de réduire la dépendance aux herbicides (Munier-Jolain *et al.*, 2002). En raison des effets cumulatifs à long terme liés à la persistance des stocks semenciers, l'adaptation des seuils d'intervention dans un système de culture donné ne fait que déplacer le niveau moyen d'infestation sans modifier la pression de désherbage nécessaire pour stabiliser la densité des adventices au niveau objectif. Dans les systèmes testés, la décision du traitement herbicide et le choix des produits dépendent d'une décision multi-critère reposant sur (i) l'efficacité des programmes de désherbage candidats sur la flore présente et (ii) leur impact environnemental évalué avec l'indicateur I-pest/I-phy (Bockstaller *et al.*, 1997). L'outil d'aide à la décision DECID'Herb (Munier-Jolain *et al.*, 2005) permet de choisir des solutions les plus conformes aux exigences multi-critères. Les impasses de désherbage sont décidées soit lorsque les niveaux d'infestation sont faibles au regard des infestations dans les cultures précédentes dans la succession (pas de tendance

constatée à la dégradation du niveau d'enherbement), soit lorsque les solutions envisageables présentent de mauvais profils environnementaux. Pour les systèmes SC4 et SC5, le désherbage mécanique est envisagé en priorité en suivant les recommandations issues des nombreux essais conduits depuis quelques années en France sur ce thème, et en tenant compte de l'expérience acquise par la ferme expérimentale dans ce domaine. Dans le système SC4, le seul permettant d'associer le désherbage chimique et le mécanique, le désherbage chimique est localisé sur le rang sur les cultures à grand écartement au semis ou en post-levée.

### Encadré 1 : Fréquence du labour dans la rotation

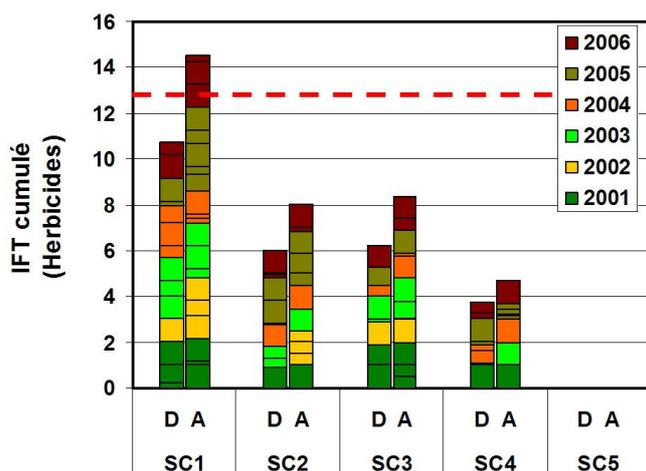
Les simulations réalisées pour le vulpin avec un modèle démographique très simple (Munier-Jolain *et al.*, 2002) montrent les interactions entre la rotation et la fréquence du labour (Figure 1). Le cas d'étude est une rotation maïs-blé, et le modèle repose sur l'hypothèse que le vulpin n'infeste que le blé, les germinations de printemps étant détruites par les préparations de sol au semis du maïs. En cas de travail superficiel tous les ans, les semences produites par les vulpins se développant dans le blé restent en surface, et sont donc en position favorable pour infester le blé suivant, deux ans après. Malgré un désherbage anti-graminées systématique dans le blé, la maîtrise de la population n'est pas assurée. En cas de labour tous les ans, les semences produites sont enfouies en profondeur, mais remontées par le labour suivant juste avant le semis du blé. L'effet de dilution du stock semencier sur l'épaisseur travaillée par les deux labours successifs permet de réduire le potentiel d'infestation, ce qui contribue à la maîtrise de la population, mais nécessite toujours un traitement presque tous les ans dans le blé. En revanche, en cas de labour un an sur deux, les semences restent en profondeur pendant deux ans avant d'être remontées en surface juste avant le semis du maïs, qui ne permet pas une nouvelle production semencière. La durée entre deux générations successives de vulpin est alors de 3 ans, au lieu d'un an dans le cas du labour tous les ans. La population de vulpin est maîtrisée, alors que l'usage des herbicides anti-graminées est limité à quelques traitements, un blé sur 8 environ. Selon ces simulations, la place du labour (avant le semis du blé ou avant le semis du maïs) n'a pas d'influence sur le comportement de la population. Ces résultats théoriques ont permis de définir la règle liée à la fréquence du labour dans les systèmes de Protection Intégrée (sauf le système SC2, sans labour par définition)



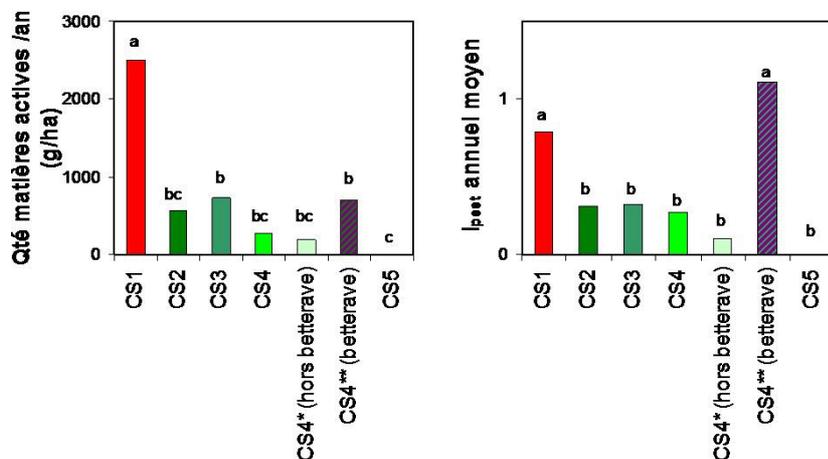
## Résultats : évaluation multicritère des systèmes de PI contre la flore adventice

### Dépendance aux herbicides et impacts environnementaux liés aux herbicides

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) intégrant le nombre de passages et la dose appliquée (en relatif par rapport à la dose homologuée) est un bon indicateur de la dépendance aux pesticides. Sur la période 2001-2006, l'IFT-Herbicides des systèmes en PI a été divisé par 2 pour les systèmes SC2 et SC3 par rapport au système de référence, et par 3 pour le système SC4, système de Protection Intégrée 'typique' (Figure 2), montrant ainsi une forte réduction de la dépendance aux herbicides de ces systèmes. L'IFT-herbicide du système SC5 est évidemment nul.



**Figure 2 :** Indice de Fréquence de Traitement (IFT) cumulé pour les 10 parcelles de l'essai au cours des 6 premières années 2001-2006. D et A sont les deux îlots de parcelles correspondant aux deux répétitions. La ligne horizontale en pointillés correspond à la moyenne du système de référence SC1



**Figure 3 :** Quantité moyenne de substances actives et indicateur I-pest annuel moyen sur les campagnes 2001-2006, pour les 5 systèmes de culture testés. Le système SC4 est le seul comportant une année de betterave qui affecte considérablement les indicateurs d'impacts environnementaux. La betterave est donc présentée séparément (d'après Debaeke *et al.*, sous presse).

L'évaluation des systèmes en termes de quantité de substances actives herbicides et d'indicateur d'impact I-pest (Bockstaller *et al.*, 1997), est encore plus discriminante (Figure 3). La réduction de la quantité appliquée est de l'ordre de 70 % pour les systèmes SC2 et SC3, de l'ordre de 90 % pour le système SC4. Les résultats en termes d'indicateur d'impact environnemental (I-pest) sont également satisfaisants. En betterave, malgré l'application d'herbicides en mélange à faibles doses, mais de façon répétée, et malgré le désherbage localisé sur le rang, en complément du binage de l'inter-rang qui permet de diviser par 3 la dose par hectare, la quantité de substances actives appliquées est assez importante. Par ailleurs, l'indicateur I-pest est défavorable aux mélanges de produits à faibles doses, et donc à la betterave, en raison du mode d'agrégation retenu.

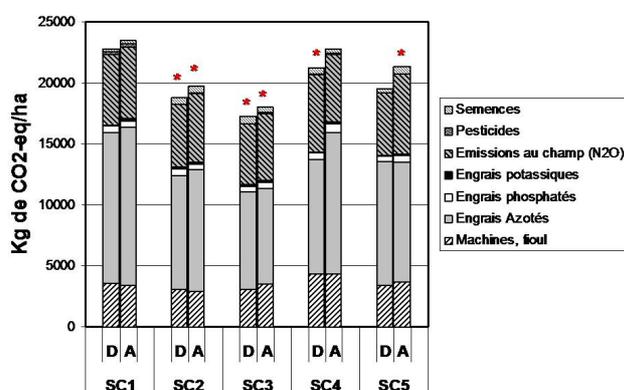
**Encadré 2 : Indicateurs 'Pesticides'**

Les indicateurs IFT et  $I_{\text{pest-Iphy}}$  sont deux indicateurs 'Pesticides' complémentaires :

- L'indicateur IFT est un indicateur de dépendance aux pesticides. Il se calcule par cumul du nombre de traitements, chaque traitement étant pondéré par la dose utilisée, exprimée en valeur relative par rapport à la dose homologuée pour la cible visée.
- L'indicateur  $I_{\text{pest-Iphy}}$  (Bockstaller *et al.*, 1997) est un indicateur d'impact environnemental. Il s'agit d'un système complexe intégrant les risques parcellaires de transfert vers les eaux des rivières et des nappes phréatiques (en fonction par exemple de la texture, de la pente de la profondeur de sol), les conditions d'application (couverture du sol par la végétation à la date de traitement) et les caractéristiques intrinsèques des substances actives (mobilité dans le sol, durée de persistance, toxicité pour les humains et divers organismes aquatiques, volatilité dans l'air...).  $I_{\text{pest}}$  et  $I_{\text{phy}}$  sont un seul et même indicateur : ils ne diffèrent que par l'échelle de présentation : de 0 (bon) à 1 (mauvais) pour  $I_{\text{pest}}$  ; de 10 (bon) à 0 (mauvais) pour  $I_{\text{phy}}$ . Les calculs présentés dans cet article correspondent au cas d'une parcelle aux risques moyens de transfert par ruissellement et par lessivage.

*Autres impacts environnementaux*

Les systèmes de culture testés sur le dispositif reposent largement sur des stratégies de sol nu pendant les intercultures associées à des passages d'outils superficiels nombreux pour favoriser la levée et la destruction des plantules adventices et réduire d'autant le stock semencier superficiel. Ces passages d'outils consomment du carburant et génèrent des émissions de gaz à effet de serre. En systèmes SC4 et SC5, le désherbage mécanique est une source supplémentaire de consommation d'énergie. Il est donc important d'évaluer les conséquences de ces systèmes sur la consommation d'énergie et la contribution au réchauffement climatique. Une méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Gaillard *et al.*, 2007) a été utilisée pour quantifier ces impacts. Seule la production de gaz à effet de serre (GES) est présentée ici, mais les résultats concernant la consommation d'énergie sont assez similaires.



**Figure 4 :** Emissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalents CO<sub>2</sub> par hectare pour une échéance de 100 ans, cumulés sur 6 ans (campagnes 2001-2006) pour les 10 parcelles de l'expérimentation (d'après Deytieu *et al.*, en préparation). Les émissions sont estimées avec la méthode SALCA (Gaillard *et al.*, 2007). Les étoiles correspondent aux successions culturales intégrant une légumineuse

Selon les estimations, la contribution au réchauffement climatique est plutôt plus faible dans les systèmes relevant de la PI, comparés à la référence (Figure 4). Ceci est lié au fait que la mécanisation ne représente qu'une faible part dans les émissions de GES. La majeure partie des émissions est liée directement ou indirectement aux engrais azotés, soit par le biais de l'énergie nécessaire à la synthèse des engrais, soit par le biais des émissions d'oxydes d'azote liées aux pertes d'engrais azotés. Or, les apports d'engrais azotés ont été plus faibles dans les systèmes en PI, d'une part parce que les niveaux de fertilisation azotée sont réduits en céréales, en cohérence avec des dates de semis tardives et des objectifs de rendements réduits, d'autre part parce que la diversification des successions culturales a permis d'introduire des légumineuses (soja, féverole, lupin) qui ne reçoivent aucun engrais azoté. Selon ces résultats, il apparaît clairement que, pour diminuer l'impact des cultures sur le réchauffement

climatique, il est beaucoup plus efficace d'optimiser la fertilisation azotée que de limiter le nombre de passages d'outils lorsque ceux-ci sont utiles par ailleurs pour maîtriser des bioagresseurs. Ceci est moins vrai si l'on considère l'impact « consommation en énergie » pour lequel les engrais et la mécanisation contribuent de manière quasi équivalente.

### *Maîtrise de la flore adventice*

La densité ou la biomasse des adventices à une date donnée ne sont pas des bons indicateurs de maîtrise de la flore. Un niveau d'enherbement plus important dans un système utilisant peu d'herbicides par rapport à un système à très forte utilisation d'herbicide peut être toléré si ces niveaux ne pénalisent pas le rendement de façon significative. De plus, un enherbement maîtrisé (choix des espèces présentes) peut être favorable aux diverses composantes de la biodiversité (ex. ressources trophiques). Le principal indicateur de maîtrise retenu est l'évolution démographique au cours du temps. Par exemple, sur le système SC4 de Protection Intégrée typique (îlot A), à faible usage d'herbicide, l'abondance des espèces n'augmente pas au cours de la période 2001-2006 (Figure 5). Les valeurs des coefficients de corrélation entre d'une part le rang de l'année (depuis le début de l'essai) et d'autre part la densité de mauvaises herbes calculées pour les 10 parcelles montrent que la densité des adventices décroît ou se maintient sur cette période (Tableau 2) pour l'ensemble des espèces ou pour les différents groupes (dicotylédones à germination automnale, dicotylédones à germination printanière, graminées), à seulement deux exceptions :

- L'augmentation de la densité de graminées (principalement vulpin) sur une des 2 parcelles du système SC2 confirme qu'il est délicat de réduire l'usage d'herbicides anti-graminées sur les systèmes sans labour. Cependant, on a aussi montré que pour ces espèces à stock semencier peu persistant, l'augmentation du potentiel d'infestation peut être très rapide pendant les années favorables à la multiplication de l'espèce, mais également que la décroissance peut être très rapide au cours d'une année sans apport de nouvelles semences.
- L'augmentation de la densité de dicotylédones printanières sur une parcelle du système SC4 s'explique par un événement défavorable. Le désherbage mixte 'chimique sur le rang-mécanique dans l'inter-rang' en betterave a été mal maîtrisé la première année où la technique a été utilisée sur le domaine expérimental. Ceci s'est traduit par une infestation et une production semencière importantes et par des levées denses de plantules dans les cultures suivantes. Toutefois, ces levées étaient soit trop tardives pour concurrencer les cultures, soit bien maîtrisées par le désherbage et n'ont par conséquent pas eu de conséquence agronomique importante. La même technique de désherbage mixte a été beaucoup mieux maîtrisée sur l'autre parcelle du système SC4 l'année suivante.

Globalement, sur l'ensemble des 8 parcelles conduites selon les principes de PI, la maîtrise de la flore est satisfaisante, même sur les systèmes sans aucun herbicide.

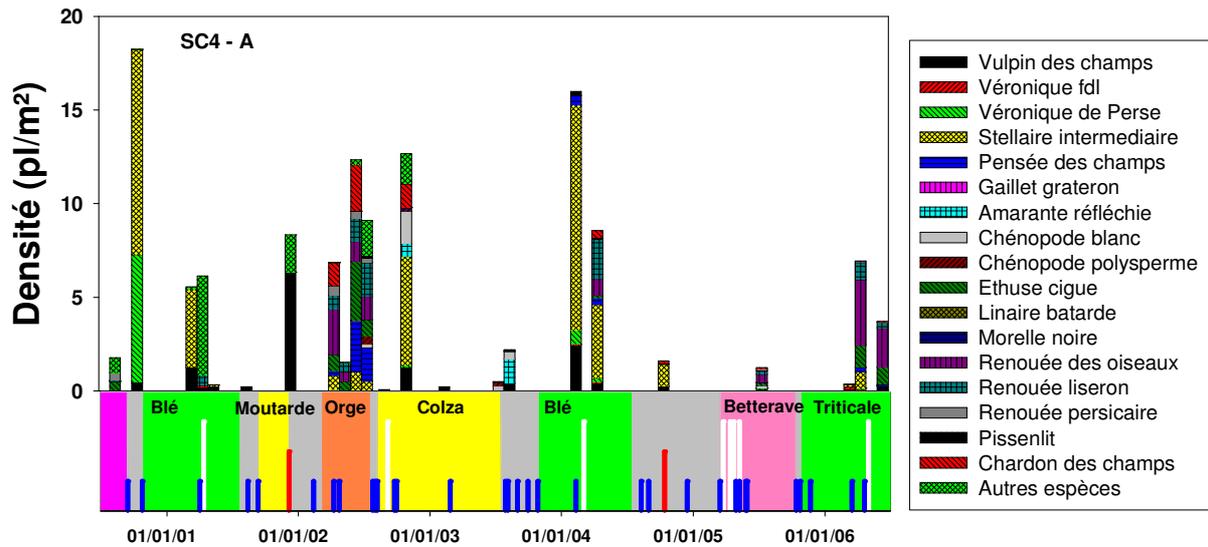


Figure 5 : Evolution démographique de la communauté adventice sur la parcelle SC4-A au cours des 6 premières campagnes de l'expérimentation

Tableau 2 : Coefficients de corrélation de Spearman entre le rang de l'année (depuis le début de l'essai) et la densité des adventices, pour les 10 parcelles de l'expérimentation, respectivement avant et après désherbage. Un coefficient de corrélation non significativement différent de 0 indique une densité stable au cours du temps et donc une infestation maîtrisée (d'après Chikowo *et al.*, soumis).

	Rep	Toutes espèces		Annuelles Dicots hivernales		Annuelles Dicots printemps-été		Annuelles Graminées	
		Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage	Avant désherbage	Après désherbage
SC1 - Standard	A	-1***	0.1	-1***	0.20	-0.73	-0.2	0.2	0.7
	D	-0.4	0.77	0.8	-0.67	-0.77	0.15	0.4	0.52
SC2 - PIC - TCS	A	-0.8	0.20	-0.77	-0.72*	-0.31	0.01	0.4	0.43
	D	0.66	-0.08	0.87	0.29	-0.72	0.34	0.87*	-0.05
SC3 - PIC sans désherbage méca.	A	0.16	-0.19	0.16	0.31	0.32	-0.13	-0.88*	-0.87**
	D	nc	-0.06	nc	0.34	nc	0.14	nc	-0.35
SC4 - PIC avec désherbage méca.	A	nc	0.07	nc	0.20	nc	0.12	nc	0.22
	D	nc	0.55	nc	-0.23	nc	0.87*	nc	-0.23
SC5 - zero herbicide	A	-0.2	0.07	-0.86	0.11	0.15	0.07	-0.31	-0.07
	D	-0.1	-0.14	0.05	0.00	-0.16	-0.05	0.05	0.30

nc : données manquantes

- ⇒ Décroissance de l'infestation : maîtrise de la flore OK
- ⇒ Stabilité de l'infestation : maîtrise de la flore OK
- ⇒ Croissance de l'infestation : défaut de maîtrise

*Aspects socio-économiques : organisation du travail et performance économique*

Les principes de PI tels qu'ils sont expérimentés à Epoisses présentent des éléments défavorables à l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation agricole, ce qui peut limiter la faisabilité et l'acceptabilité des systèmes. La multiplication des passages d'outils pour la réalisation des faux-semis et le désherbage mécanique, parfois avec des outils à faible débit de chantier, sont susceptibles de

généraliser des difficultés d'organisation du travail pour l'agriculteur. En contrepartie, le nombre de passages de pulvérisateur est diminué, et la diversification des successions culturales permet d'attendre une meilleure répartition des travaux dans le temps. Du point de vue économique, on attend des réductions des charges en pesticides, mais également des charges de mécanisation plus élevées et des rendements plus faibles en tendance. Des simulations de l'organisation du travail dans des exploitations agricoles fictives qui pratiqueraient les systèmes de culture testés sur l'expérimentation de longue durée ont été réalisées avec le simulateur Equip'agro (Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne). Ces simulations intègrent le nombre de jours disponibles pour les travaux agricoles aux différentes périodes de l'année, en fonction des conditions climatiques, du type de sol et de la nature des interventions à réaliser. Cette analyse a montré que les opérations de travail du sol pour la réalisation de faux-semis et le désherbage mécanique s'intègrent potentiellement bien dans le calendrier de travail. En revanche, la règle des semis tardifs des céréales peut générer des tensions d'organisation du travail en raison de la baisse rapide du nombre de jours disponibles pour les semis à la fin octobre et en novembre. L'étude économique a confirmé la très forte réduction du coût des intrants pesticides en système PI (en moyenne -150 euros par ha). Mais les rendements sont en moyenne plus faibles : en blé, la production est réduite d'environ 20% du fait des semis tardifs, de la moindre fertilisation azotée, du choix variétal n'intégrant pas de façon prioritaire le critère de productivité. Pour d'autres cultures, comme le colza ou l'orge, les rendements sont équivalents à la référence. Les systèmes en PI sont aussi caractérisés par des successions diversifiées, intégrant des cultures « de diversification » semées au printemps, présentant un potentiel de rendement plus faible et moins stable entre années. Globalement, en utilisant les données issues de l'expérimentation, la mise en œuvre des systèmes de PI générerait une baisse du revenu agricole, de l'ordre de 100 euros par hectare dans le contexte des prix de l'année 2006. Cet écart est essentiellement lié à la faible productivité des cultures « de diversification », et non au rendement du blé ou aux charges de mécanisation. Bien qu'on puisse penser qu'il existe un potentiel pour améliorer la maîtrise et la productivité de ces cultures « de diversification », ces résultats indiquent que les systèmes de PI nécessiteront un soutien financier pour assurer leur compétitivité, soit par des prix du marché tenant compte de leur haute qualité environnementale, soit par des différentiels de soutien public.

### **Valorisation du dispositif expérimental et relation avec le développement agricole**

De nombreuses initiatives ont vu le jour en France pour expérimenter des systèmes innovants relevant de la PI dans le contexte de la réalité des exploitations agricoles. Ces initiatives sont souvent animées en réseau par des Chambres d'agriculture et sont coordonnées par le RMT 'Systèmes de Culture Innovants'. La démarche consiste à co-construire des systèmes innovants avec les agriculteurs volontaires et à évaluer les progrès obtenus, notamment sur le plan des impacts environnementaux. La réduction de la dépendance aux herbicides est souvent considérée comme un des principaux facteurs limitants, et l'expérimentation INRA de Dijon-Epoisses joue un rôle moteur de démonstration de la faisabilité et de l'efficacité technique de la PI contre la flore adventice. De nombreux groupes d'agriculteurs et de conseillers ont visité le dispositif et pu constater sur le terrain la bonne maîtrise de la flore dans des systèmes très peu consommateurs d'herbicides. Evidemment, la co-construction avec les agriculteurs de systèmes innovants est difficile en raison des contraintes spécifiques de chaque exploitation, en particulier la contrainte économique. Les agriculteurs motivés par la réduction de la dépendance aux pesticides ont naturellement tendance à privilégier des évolutions incrémentales progressives de leurs systèmes de culture, en adoptant dans un premier temps les éléments techniques de la PI qui leur semblent les plus accessibles. Cette démarche naturelle peut cependant présenter un risque, car il est probable que les systèmes intermédiaires entre le « tout chimique » et la « PI en rupture » ne correspondent pas à des « optimum » du point de vue des performances économiques et environnementales.

La valorisation commune de ces initiatives, permise par l'organisation en réseau, est un élément important. D'une part, elle permet une cohérence d'ensemble des initiatives locales, la construction d'une expertise partagée par les différents interlocuteurs du réseau. D'autre part, la comparaison sur une base multi-critères des systèmes testés sur le territoire national, dans leur diversité, permettra de mettre en évidence les antagonismes éventuels entre différents critères d'évaluation (par exemple, la valeur environnementale et la performance économique), de caractériser la forme de ces antagonismes, permettant d'orienter les décisions des pouvoirs publics qui encadreront les évolutions probables de l'agriculture, et enfin d'identifier les systèmes les plus performants et de les analyser pour comprendre les déterminants de leur succès.

**Remerciements :** *Dominique Meunier, Florence Strbik, François Dugué, Pascal Farcy, Philippe Chamois et toute l'équipe 'Systèmes de Culture' du Domaine expérimental d'Epoisses contribuent à la conduite de l'expérimentation de longue durée et au suivi des parcelles. Les travaux présentés ont été soutenus financièrement par la Région Bourgogne, le projet ANR GEDUPIC et le réseau Européen ENDURE. Nous remercions également Gérard Gaillard et Thomas Nemecek d'ART (Suisse) pour leur collaboration à la mise en œuvre de la méthode SALCA.*

### Références bibliographiques

- Aubertot J.N., Colbach N., Félix I., Munier-Jolain N.M., Roger-Estrade J., 2006. Partie 3, chapitre 8: La composante biologique. In : T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*, Versailles, France, INRA Éditions, p. 199-224.
- Barralis G., Chadoeuf R., Lonchamp J., 1988. Longévité des semences de mauvaises herbes annuelles dans un sol cultivé. *Weed Research* 28, 407-418.
- Bellon S., Bockstaller C., Fauriel J., Geniaux G., Lamine C., 2007. To design or to redesign: how can indicators contribute. In: Donatelli, Hatfield, Rizzoli, (Eds). *Farming systems design 2007: an international symposium on methodologies for integrated analysis of farm production systems; Field-farm scale design and improvement*. La Goliardica Pavese, Pavia (ITA), 2007. p 137-138.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy* 7, 261-270.
- Bockstaller C., Girardin P., 2006. Evaluation agri-environnementale des systèmes de culture : la méthode INDIGO. *Oléoscope* 2006, 85, 4-6
- Colbach N., Gardarin A., Granger S., Guillemin J.P., Munier-Jolain N., 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés. *Innovations Agronomiques* (sous presse).
- Debaeke P., Munier-Jolain N.M., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2008. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. *Agronomy for Sustainable Development* (sous presse).
- Edwards S.G., 2004. Influence of agricultural practices on fusarium infection of cereals and subsequent contamination of grain by trichothecene mycotoxins. *Toxicology Letters* 153, 29-35.
- Gaillard G., Freiermuth R., Baumgartner D., Calanca P.L., Jeanneret P., Nemecek T., Oberholzer H. R., Prasuhn V., Richner W., Weisskopf P., 2007. Methode zur Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Systeme. *Schriftenreihe der ART*.
- Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7, 81-87.
- Kurstjens D.A.G. Kropff M.J., 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. *Weed Research* 41, 211-228.
- Lancon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gerardeaux E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101-110.

Munier-Jolain N.M., 2001. Effets de l'écartement entre les rangs sur la croissance et la production semencière des mauvaises herbes. In : 17ème Conférence du COLUMA - Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes. Toulouse

Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* 42, 107-122.

Munier-Jolain N.M., Savoie V., Kubiak P., Maillet-Mézeray J., Jouy L., Quéré L., 2005. DECID'Herb, a decision support system on the WEB, designed for sustainable weed management in cultivated fields. In : XIII European Weed Research Society Symposium. Bari, Italy.

Nolot J.M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agriculture* 12, 387-400.

Olsen J., Kristensen L., Weiner J., Griepentrog H.W., 2005. Increased density and spatial uniformity increase weed suppression by spring wheat. *Weed Research* 45, 316-321.

Reau R., Meynard J.M., Robert D., Gitton C., 1996. Des essais factoriels aux essais "conduite de culture". In : Expérimenter sur les conduites de cultures: un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. Paris, DERF-ACTA, p. 52-62.

Sen D.N., 1988. Key factors affecting weed-crop balance in agroecosystems. In: M.A. Altieri, M. Liebman (Eds.), *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*. CRC Press, New-York, p 157-182.

## **Raisonnement des pratiques et des changements de pratiques en matière de désherbage : regards agronomique et sociologique à partir d'enquêtes chez des agriculteurs**

**C. Compagnone<sup>1</sup>, F. Hellec<sup>2</sup>, K. Macé<sup>3</sup>, P. Morlon<sup>4</sup>, N. Munier-Jolain<sup>5</sup>, L. Quéré<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> : ENESAD - INRA SAD Listo, 26 Bd du Dr Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex

<sup>2</sup> : INRA -SAD Mirecourt Domaine du Joly, BP29, 88501 Mirecourt

<sup>3</sup> : Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor, 8E rue de la bise, 22100 Taden

<sup>4</sup> : INRA SAD Listo, 26 Bd du Dr Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex

<sup>5</sup> : UMR INRA-UB-ENESAD 1210 Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, 21065 Dijon cedex

<sup>6</sup> : Chambre d'Agriculture d'Ille et Vilaine, 52 avenue du port, 35480 Guipry

Correspondance : c.compagnone@enesad.fr ; Pierre.Morlon@enesad.inra.fr

### **Résumé**

Pour accompagner les agriculteurs vers des systèmes et des pratiques plus « durables », il faut partir de ce qu'ils font actuellement : comment ils raisonnent leurs pratiques, et comment ils élaborent ces raisonnements. Le regard des agronomes montre que les agriculteurs ont des itinéraires techniques de désherbage complexes et divers, qui s'insèrent dans un raisonnement à plusieurs échelles de temps : la campagne agricole, la rotation et le long terme. Il permet aussi d'approcher la structure des processus de décision et la façon dont ces itinéraires se modifient au cours du temps, par accumulation d'expérience ou en réponse à des facteurs extérieurs. Le regard du sociologue porte sur l'aspect cognitif du changement chez des viticulteurs, et sur le dialogue entre viticulteurs et entre viticulteurs et conseillers.

### **Abstract**

To ensure successful, more sustainable weed management practices, it is crucial to take account of farmer's decision-making processes. Agronomists revealed that interviewed farmers had complex and various weeding programmes, and that, when designing these programmes, they integrated different time scales: the current year, the rotation, and the long term. They gave some light, too, on the decision-making processes and how it changes over time. Sociologists analyzed the way wine-growers bring about change from the cognitive angle and its bearing on interactive dialogue between the wine-growers themselves as well as with technical advisors

---

### **Introduction**

La question sur la façon dont les agriculteurs raisonnent leurs pratiques renvoie, bien évidemment, à la dimension cognitive de ces pratiques. Ceci ne signifie pas pour autant que dans leur mise en œuvre pratique tous les actes se trouvent continuellement réfléchis : ils l'ont été, à des moments différents, au fur et à mesure de leur agencement dans le temps, mais il arrive que la seule raison que l'on puisse avancer aujourd'hui pour expliquer ce que l'on fait soit que l'on a toujours procédé ainsi. Les sciences de la cognition mettent largement en avant comment, en situation stable, des « routines » se mettent en

place pour permettre au cerveau de se consacrer à d'autres tâches et à d'autres sujets de réflexion. Mais quand la situation n'est pas stable, parce que la pratique est en cours de changement ou parce qu'il faut l'ajuster à des conditions variables, elle nécessite d'être repensée. Ces cas de figure sont particulièrement intéressants à étudier car ils permettent de suivre la façon dont les agriculteurs procèdent pour réajuster leur manière de faire. C'est ce à quoi nous nous intéressons dans cet article, à propos de la lutte contre les adventices, en mettant en relief les deux aspects, individuel et social, de la cognition. A travers l'aspect individuel, nous montrons comment les différents éléments d'une logique pratique non seulement s'agencent les uns avec les autres pour former un ensemble cohérent, mais aussi comment ils permettent d'identifier des situations particulières pour ajuster les interventions pratiques. A travers l'aspect social, nous nous ne centrons plus sur la façon dont des connaissances s'articulent entre elles dans un individu, mais à la façon dont elles sont portées collectivement par un ensemble d'agriculteurs au sein d'un réseau de relations.

### **Un regard d'agronomes : Comment des agriculteurs pensent la maîtrise des adventices (essai de représentations graphiques)**

En agriculture conventionnelle, les herbicides chimiques sélectifs constituent LA solution efficace, rapide, et qui utilise le même matériel que d'autres produits... Solution adoptée de façon prépondérante au point que, en agriculture conventionnelle, « désherbage » semble s'identifier à « application d'herbicides chimiques »... et que le conseil semble parfois se résumer à « Contre telle adventice, vous mettez tel herbicide à telle dose ». Peut-on continuer ainsi ? Non, certes, mais, pour changer, il faut partir de la façon dont les agriculteurs prennent leurs décisions... C'est pourquoi nous - des gens de l'INRA, d'Instituts Techniques (CETIOM et ITL) et d'écoles d'agronomie - avons fait des enquêtes auprès d'agriculteurs - pour situer : 35 exploitations, dans 8 régions, avec la plus grande diversité possible de systèmes : SAU totale de 35 à plus de 500 ha, de 35 à 235 ha de SAU par UTH, conventionnels et bio, grandes cultures seules ou avec élevages divers, labour ou non-labour, etc. Les questions que nous nous posions étaient : comment les agriculteurs planifient-ils la lutte contre les adventices ? Comment décident-ils du choix des moyens de lutte et de leurs modalités ? Quels facteurs et contraintes prennent-ils en considération ? Comment intègrent-ils le temps ?

#### *A l'échelle de la campagne, les itinéraires techniques*

Pour exploiter ces enquêtes (Macé et al., 2007), nous avons d'abord construit, à l'échelle de la campagne, des schémas d'itinéraires techniques par culture. Les exemples qui suivent illustrent chacun un point important - seul le premier sera présenté de façon un peu détaillée. Ces exemples sont datés, puisque ces itinéraires techniques évoluent au cours du temps.

Monsieur 13 (Figure 1), en Haute-Marne, est en TCS (Techniques Culturelles Simplifiées). Il a un pulvérisateur automoteur très rapide et, tant que les conditions météo le permettent, il juge préférable de faire deux passages à faible dose plutôt qu'un seul à dose normale. Le brome, dont la présence est due à l'histoire de certaines parcelles et à sa rotation de cultures d'hiver sans labour, lui pose des problèmes. A l'interculture, il le fait lever en déchaumant puis il le détruit au glyphosate, cela une ou deux fois selon l'infestation des parcelles. En sols argileux difficiles à travailler et peu portants en conditions humides, sa stratégie est d'éliminer le maximum d'adventices à l'automne pour avoir le moins possible de choses à faire au printemps, car il ne sait pas à quelle date il pourra rentrer dans ses parcelles après l'hiver. A l'automne, il désherbe tôt, à cause du risque de ne plus pouvoir rentrer dans les parcelles, et pour réduire les coûts en traitant à faible dose, donc sur des adventices jeunes. Il met alors deux herbicides : au stade 1 feuille du blé, une faible dose de DFF et d'isoproturon, dont l'efficacité est faible si le sol est encore sec. Au stade 3 feuilles, il prévoit du Célio (clodinafop-propargyl + cloquintocet-mexyl, FOP), produit cher mais efficace en terres argileuses quelle qu'en soit l'humidité. Si l'humidité du sol est suffisante, il remplace le Célio par de l'isoproturon, moins cher. Au printemps, il

prévoit de traiter contre le brome avec du Monitor (sulfosulfuron), ce qui lui permet, par anticipation, de réduire la dose d'isoproturon à l'automne.

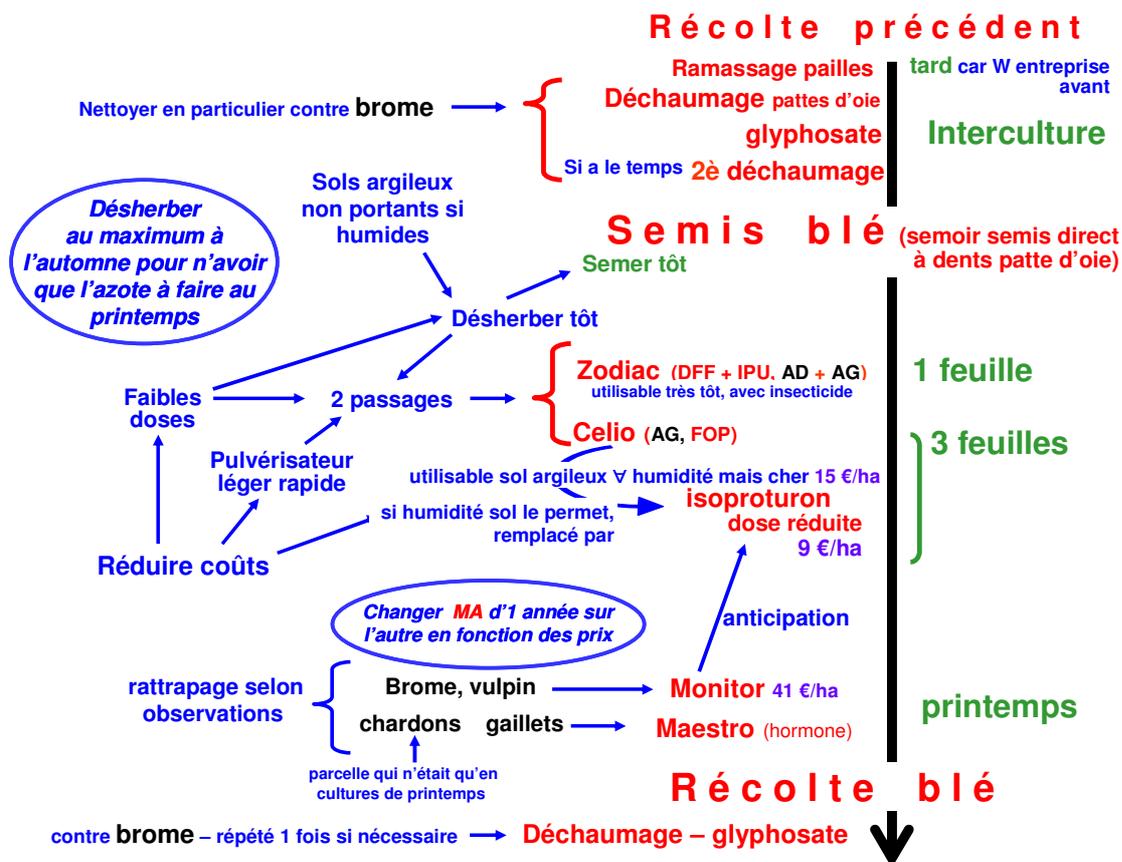


Figure 1 : L'itinéraire technique de désherbage du blé en sols argileux de Monsieur « 13 » en 2000.

Ce premier exemple illustre la complexité du raisonnement et la diversité des facteurs pris en considération, dont certains sont propres à la parcelle – type de sol et jours disponibles, flore, système de culture - et d'autres se situent au niveau de l'exploitation – matériel disponible, organisation du travail, objectifs économiques. Cela semblera évident pour tous les agriculteurs qui nous liront, ainsi que pour beaucoup de conseillers. Mais, la première fois que nous avons présenté ce genre de schémas, on nous a objecté : « Les agriculteurs que vous avez enquêtés sont certainement exceptionnels, ceux que nous connaissons viennent simplement nous demander quel herbicide utiliser contre telle mauvaise herbe »...

Diversité des facteurs et complexité du raisonnement conduisent à une grande diversité d'itinéraires techniques, à la fois entre exploitations et dans une même exploitation, ce qu'illustre l'exemple suivant.

Monsieur 9 (Figure 2) est dans la plaine de Dijon. En 2003, avant blé, à l'interculture, après les déchaumages, il passe un décompacteur si le sol est en bonnes conditions, mais laboure s'il est humide (semis tardif ou période pluvieuse) ou dégradé. Après semis, il distingue les parcelles où il a des problèmes de ray-grass, en sols de limons qu'il sème tôt, des autres, où il distingue celles qu'il peut désherber à l'automne (bonnes conditions après semis précoce) de celles qui ne peuvent l'être qu'au printemps.

Les agriculteurs « bio » ont pour désherber une palette réduite de moyens techniques, qu'ils raffinent à l'extrême. Avant maïs, en terres de graviers, M. 21, dans la Drôme (Figure 3), passe d'abord un coup

de vibro, puis fait deux ou trois « faux-semis » au vibro ou à la herse rotative. Après semis, il fait trois ou quatre binages, en augmentant à chaque fois la vitesse et la profondeur, ainsi que l'écartement des disques protège-plantes, qu'il finit par relever. Sa stratégie de désherbage évoluera s'il peut acheter la houe rotative qu'il a essayée.

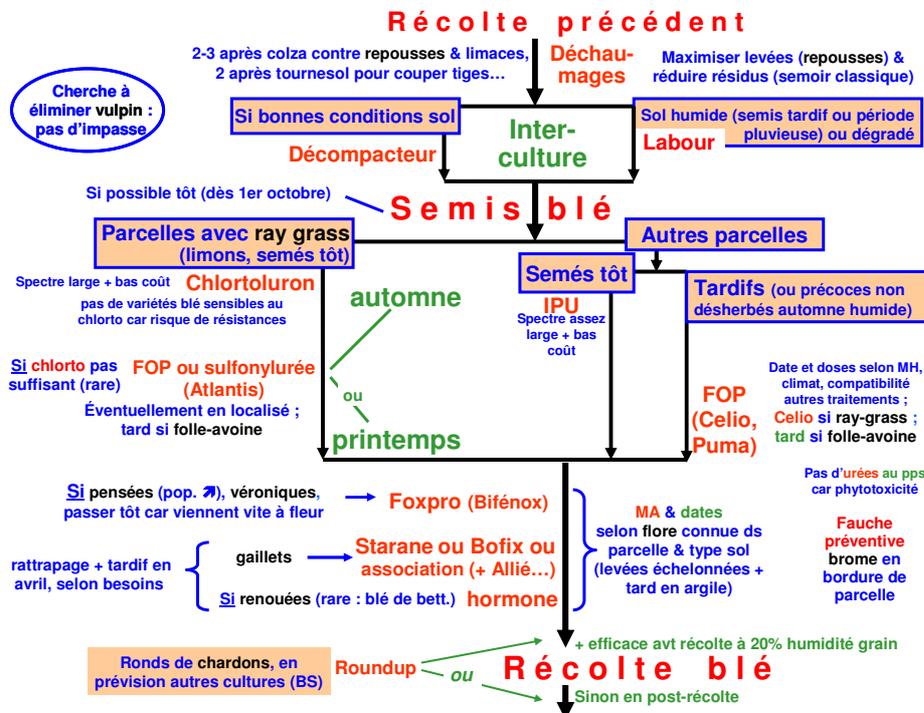


Figure 2 : Les différents itinéraires techniques de désherbage du blé de Monsieur « 9 », en 2003.

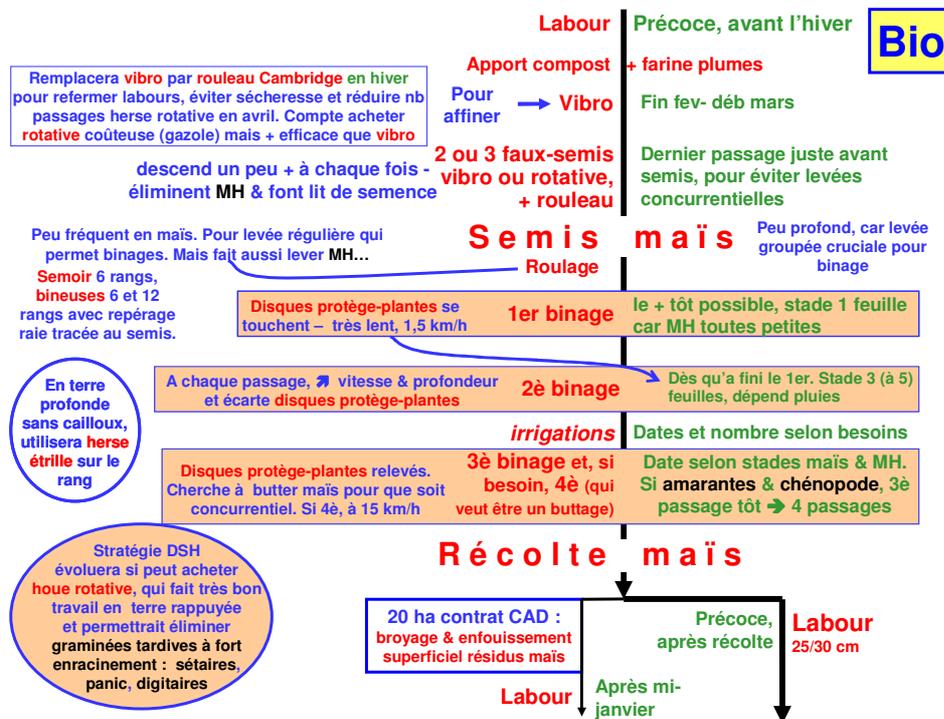


Figure 3 : L'itinéraire technique de désherbage du maïs après blé en terres de graviers de Monsieur « 21 », en 2005.

Revenons en conventionnel (où les agriculteurs font aussi des essais). Normalement, les programmes de M. 9 en colza (Figure 4) se terminent peu après le semis. Mais, par la suite, s'il y a des graminées, il les détruit en prévision du blé qui suit ; et, après la récolte, il détruit les repousses pour qu'il n'y en ait pas dans les autres cultures.

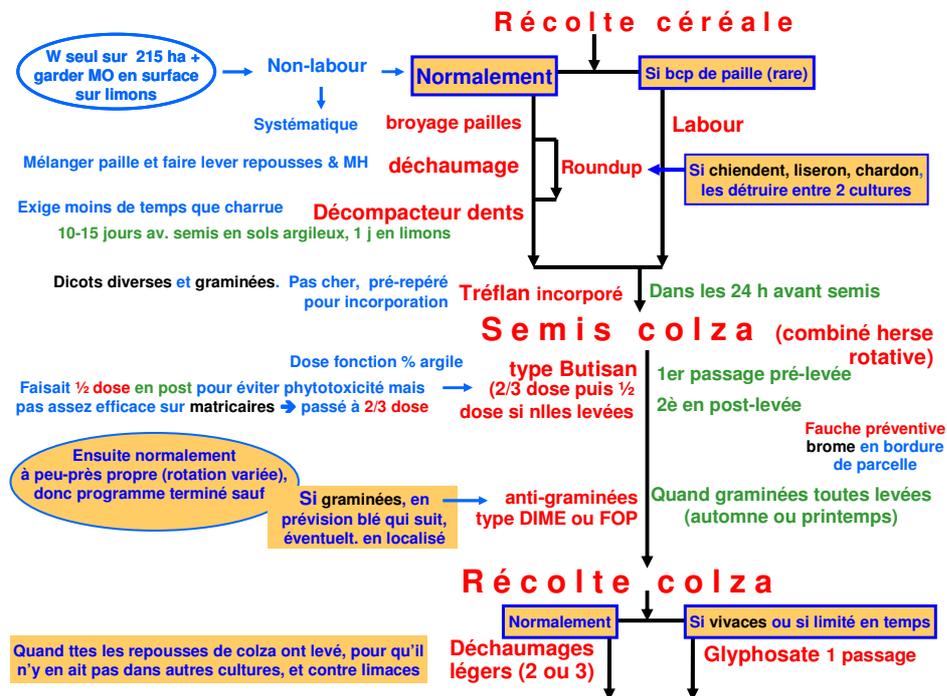


Figure 4 : Les itinéraires techniques de désherbage du colza de Monsieur « 9 », en 2003.

### Les anticipations et le raisonnement sur la rotation

Ce type de schéma à l'échelle de la campagne peut être un bon outil de réflexion pour l'agriculteur lui-même, ainsi que de dialogue entre agriculteurs et techniciens. Mais il ne représente pas tout le raisonnement. Vous avez vu, dans certains schémas, des anticipations que font les agriculteurs, et qu'ils expriment par : « telle adventice n'est pas nuisible pour la culture en place, MAIS je la détruis quand même en prévision de telle autre culture plus tard », ou au contraire : « je ne détruis pas telle adventice cette année CAR ce serait risqué ou coûteux, OR je sais que je la détruirai facilement dans la culture suivante ». Il faut donc construire d'autres schémas, à l'échelle de la rotation.

Monsieur 2 (Figure 5) élimine sur le blé les dicotylédones gênantes dans les autres cultures et, réciproquement, les graminées sur les précédents du blé où il met systématiquement un antigraminées même s'il n'y a rien de visible. Dans les pièces envahies de ray-grass ou de brome, il a modifié sa rotation, qui ne comporte qu'une paille et au contraire deux précédents à blé. Il a de gros problèmes de dicotylédones (renouée-liseron) en féverole, où il ne peut pas faire de rattrapage - mais ce n'est pas grave, il les laisse pousser, et les gère dans le blé qui suit. L'efficacité technique n'est pas seule à être pensée sur l'ensemble de la rotation, le coût l'est aussi : « pour moi le coût n'est pas simplement en blé. Il est géré avec le précédent, c'est un ensemble ».

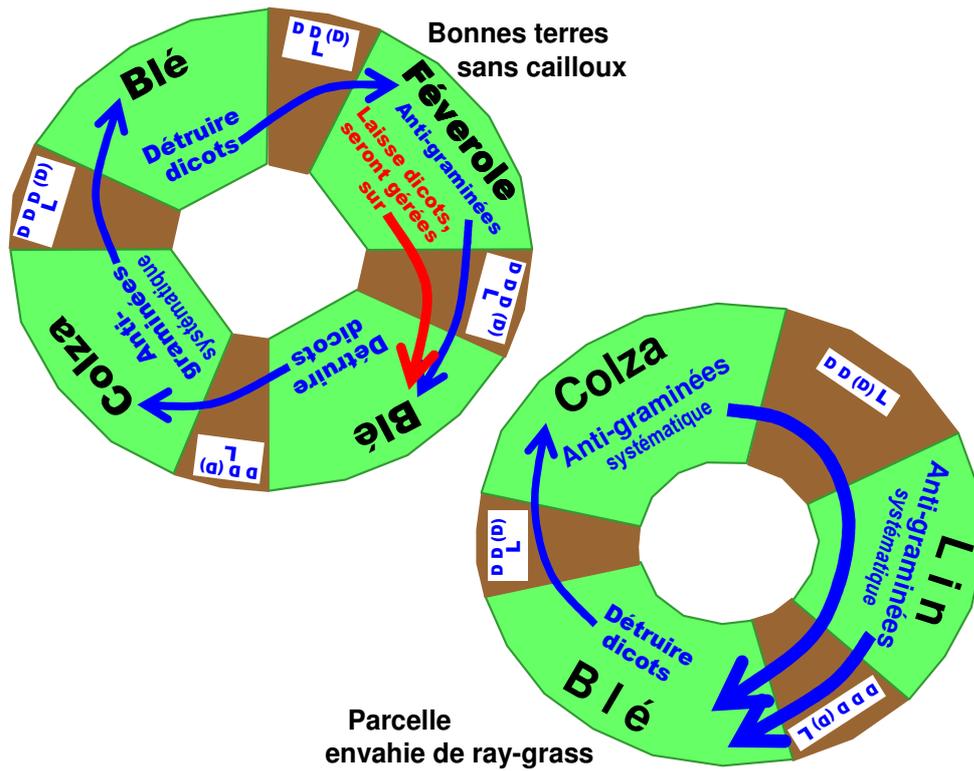


Figure 5 : Anticipations et raisonnement sur la rotation, exemple de Monsieur « 2 ».

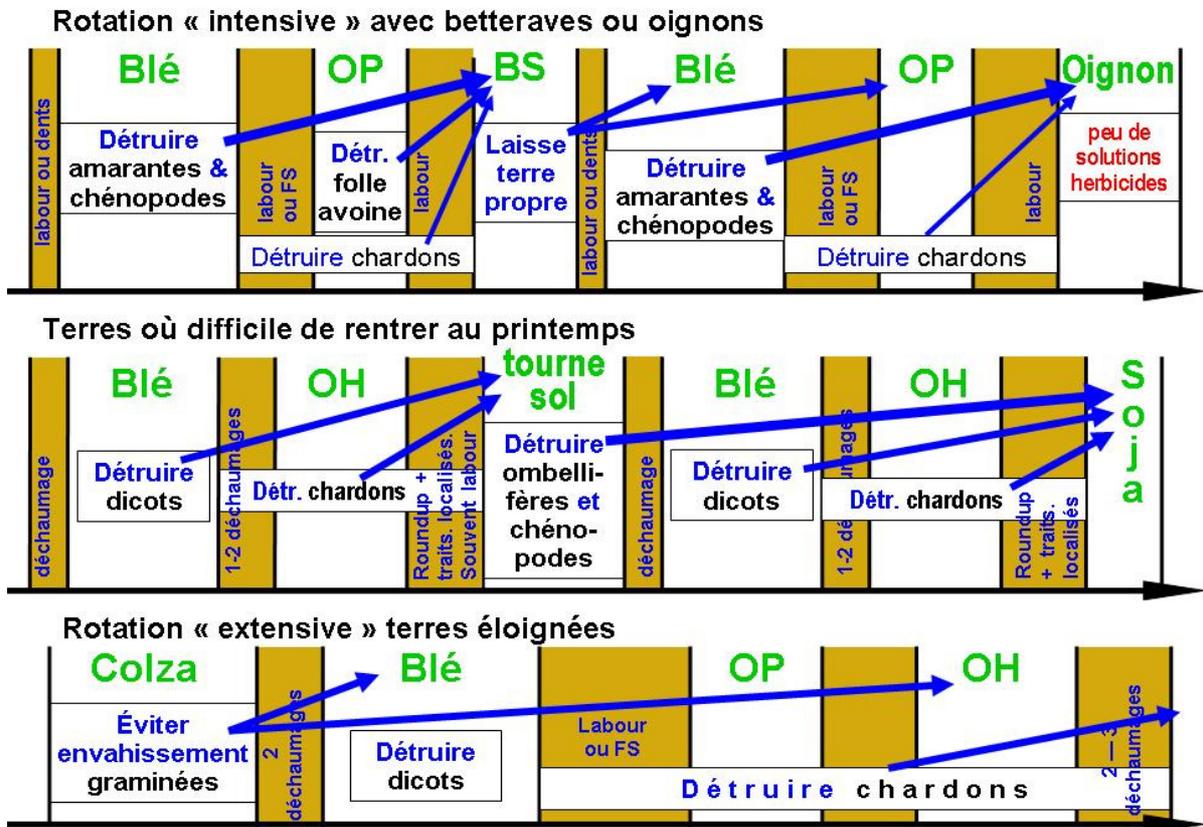


Figure 6 : Anticipations et raisonnement sur la rotation, exemple de Monsieur « 10 ».

Monsieur 10 (Figure 6), dans la plaine de Dijon, fait (faisait, en 2003...) des betteraves et oignons sur les parcelles irriguées proches, et c'est 2 ans à l'avance, sur blé, qu'il détruit les amarantes et chénopodes. Sur les terres où il est difficile de rentrer au printemps, c'est avec 3 ans d'anticipation qu'il détruit les ombellifères et chénopodes sur le tournesol, en prévision du soja. C'est sur les blés qu'il faudrait détruire les chardons mais, ses contrats lui interdisant certaines molécules, il les détruit donc sur les orges et les intercultures. Il coordonne le désherbage entre ses différentes rotations, afin d'étaler le calendrier de travail et celui d'utilisation du pulvérisateur.

A cette échelle de la rotation, les agriculteurs construisent ainsi leurs itinéraires techniques de désherbage en réponse à la question « *quand et avec quels moyens puis-je détruire telle espèce, avec le meilleur rapport bénéfice/coût ?* » (Figure 7). Dans les cas faciles, il y a des réponses à l'échelle de la campagne (ce sont les itinéraires techniques dont nous avons présenté des exemples). Mais, pour les adventices difficiles à détruire, lorsqu'il n'existe pas de solution satisfaisante dans une culture, les solutions ne se trouvent qu'à l'échelle de la rotation (Figure 8).

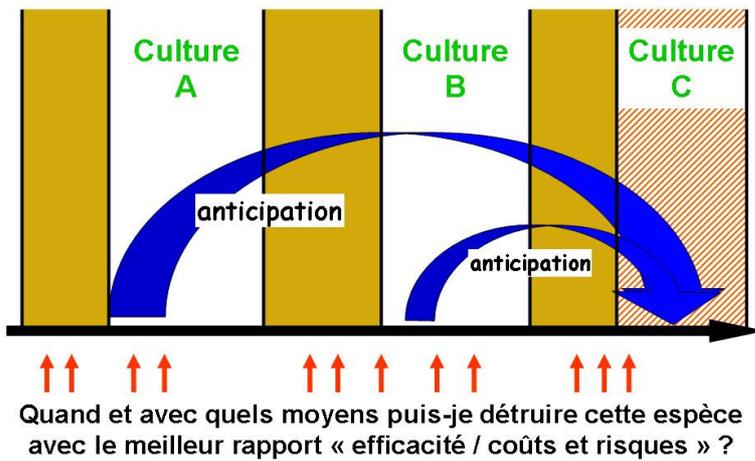


Figure 7 : Anticipations et raisonnement sur la rotation : schéma général.

ROTATION OU SUCCESSION CULTURALE								
	<table border="1"> <tr> <td>culture 1</td> <td>IC1</td> <td>culture 2</td> <td>IC2</td> <td>culture 3</td> <td>IC3</td> <td>culture 4</td> </tr> </table>	culture 1	IC1	culture 2	IC2	culture 3	IC3	culture 4
culture 1	IC1	culture 2	IC2	culture 3	IC3	culture 4		
Adventice a	lutte contre l'espèce a sur l'ensemble de la rotation							
Adventice b	lutte contre l'espèce b sur l'ensemble de la rotation							
Adventice c	lutte contre espèces c à h pendant la culture 2							
Adventice d								
Adventice e								
Adventice f								
Adventice g								
Adventice h								
Adventice i								

Figure 8 : Les deux dimensions du raisonnement du désherbage.

## Le long terme

Il y a dans tous les schémas quelque chose qui n'a pas encore été commenté. Pendant les intercultures, les déchaumages et autres travaux mécaniques, complétés ou non par des désherbants totaux, ont un objectif de long terme : réduire le stock de graines de mauvaises herbes dans le sol - ce qui s'appelait autrefois « jachère », avant que le sens de ce mot ne parte à la dérive (Morlon et Sigaut, 2008), et que les agriculteurs appellent maintenant « faux-semis ». Cela pose la question de l'impact et donc de l'acceptabilité des cultures intermédiaires (CIPAN).

## La révision des procédures

Les itinéraires techniques de désherbage que nous avons présentés sont des essais de représentation de ce que chaque agriculteur dit qu'il cherche à faire et pourquoi, et qu'il peut appliquer dans la majorité des cas, ce qui correspond à la notion de « procédure de routine » telle qu'utilisée par Cerf (1996 a & b) et Cerf et Sébillotte (1997), c'est à dire un programme, élaboré au cours du temps, et qui comprend (Figure 9) :

- le choix de la procédure, ou la vérification que les conditions initiales permettant de l'appliquer sont bien remplies ;
- des interventions systématiques, en particulier celles qui ne peuvent être faites qu'avant la levée des adventices : travail du sol et herbicides de pré-semis ou pré-levée dont les commandes se font habituellement à l'avance, en morte saison ;
- des interventions que l'agriculteur décide en fonction des observations qu'il fait dans les parcelles, selon un ou plusieurs cycles « observation – décision – mise en œuvre – évaluation du résultat » ;
- des solutions alternatives, par exemple un produit moins cher si les conditions de milieu le permettent, ou au contraire des rattrapages si les interventions ont été moins efficaces que prévu.

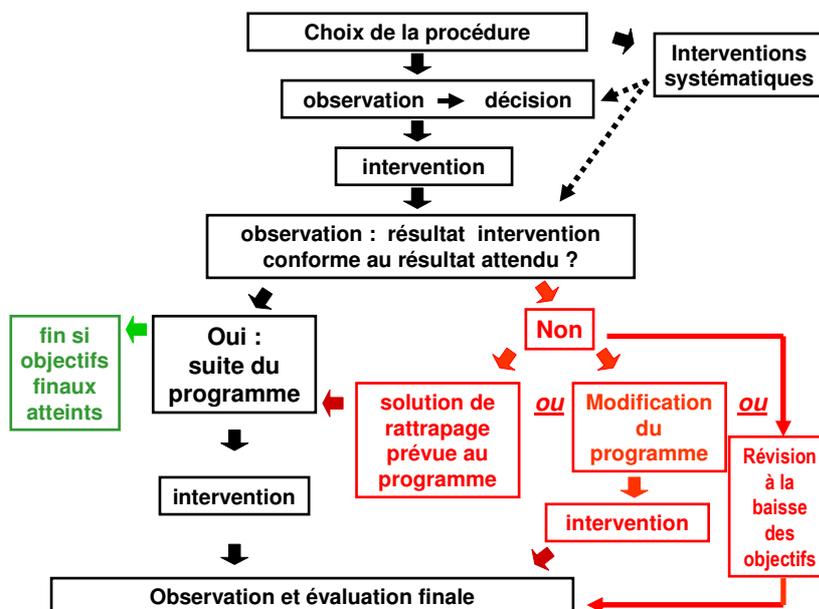


Figure 9 : Structure des itinéraires techniques de désherbage (« procédure de routine »)

Un agriculteur répète le même itinéraire technique tant qu'il lui donne satisfaction. Il le modifie en réponse à un problème grave ou suite à un changement de la rotation ou des techniques utilisées (abandon du labour, mise sur le marché ou interdiction d'une molécule...).

Chaque année (Figure 10), il fait le bilan de la campagne. S'il a atteint ses objectifs, il garde le même itinéraire la campagne suivante - quitte, par exemple, à surveiller une espèce qui a grainé sur une parcelle. S'il ne les a pas atteints, il porte d'abord plus d'attention aux conditions d'intervention, aux doses, au choix du produit de rattrapage... S'il s'agit d'un accident ponctuel, lié à de mauvaises conditions d'application ou au climat de l'année, il peut soit réviser provisoirement ses objectifs de rendement ou de propreté de la parcelle s'il sait pouvoir gérer ce salissement ultérieurement, soit opter pour une solution de secours (nouvelle intervention ou gestion différente de l'interculture). « *Quand vous voulez désherber, enfin, on fait des schémas, on élabore des schémas au départ, c'est comme la lutte contre les maladies, on fait des schémas, et puis après on change son fusil d'épaule parce que ça ne passe pas* » (Agric. 10). « *Il peut y avoir un résultat non satisfaisant et à nouveau la même stratégie parce ce n'est pas le produit qui est en cause, c'est l'application ou les circonstances. On sait qu'on est responsable du loupé et on refait un tour pour voir si on le fait dans de bonnes conditions, est-ce que le produit continue à nous convenir ? Sinon on change de stratégie. (...) Et puis des fois, vous n'avez pas tellement le choix. Vous continuez à faire un truc qui est un moindre mal en espérant qu'il y ait une autre solution* » (Agric. 4).

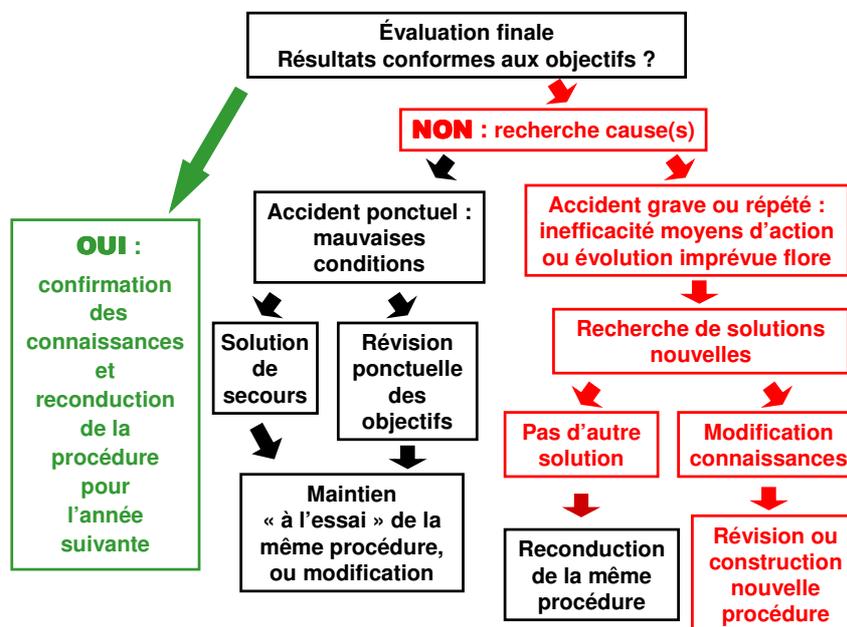
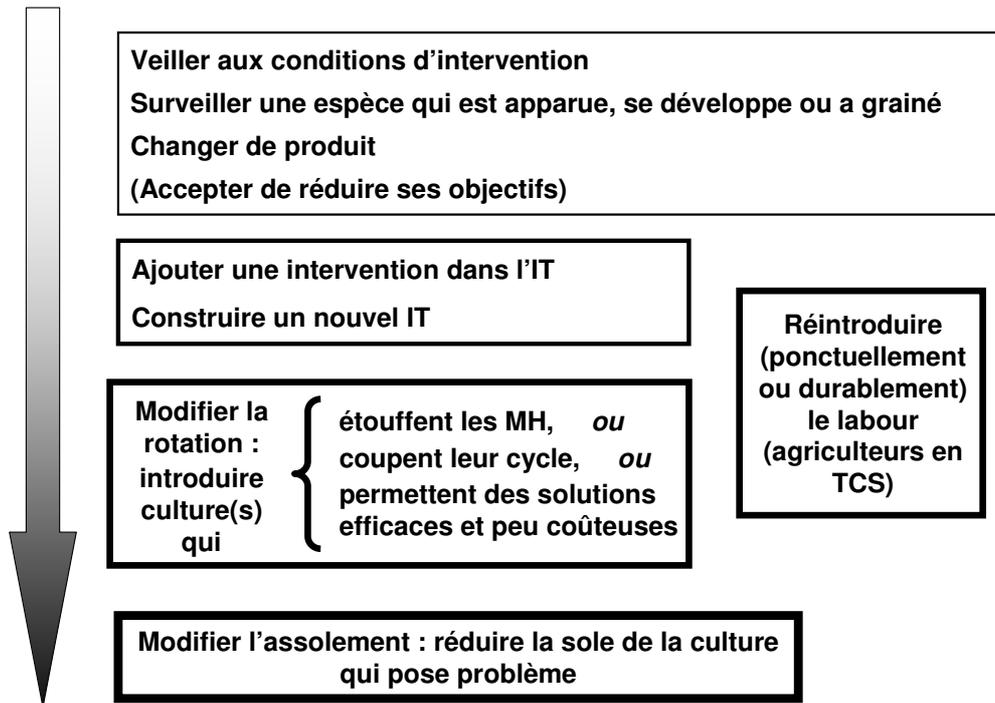


Figure 10 : Évaluation et évolution des itinéraires techniques.

S'il s'agit d'un accident plus important ou d'un échec répété, il cherche en général d'abord de nouvelles solutions chimiques pour modifier l'itinéraire ou en construire un autre. S'il n'en trouve pas, il peut décider de labourer à nouveau, provisoirement ou définitivement, ou de modifier sa rotation, en y insérant au moins une culture qui étouffe les mauvaises herbes ou qui rompt leur cycle ou sur laquelle existent des solutions chimiques ou mécaniques efficaces et peu coûteuses ; cela peut le conduire en dernier recours à modifier son assolement, en réduisant la sole de la culture sur laquelle des problèmes se posent (Figure 11).



**Figure 11 :** La gradation des solutions adoptées ou envisagées par les agriculteurs face à un échec de désherbage

### Un regard de sociologue : comment les agriculteurs maîtrisent collectivement des changements de pratique

Ce que l'approche agronomique n'aborde pas, c'est comment les connaissances nécessaires aux raisonnements présentés ont été acquises. Si l'expérience individuelle joue, une bonne part des connaissances est aussi acquise par témoignage (Bouvier et Conein, 2007). Pour autant les problèmes de mise en œuvre par les agriculteurs des techniques promues par l'encadrement technique ne peuvent pas se restreindre à des questions de communication et de circulation d'information des techniciens vers les agriculteurs. Les agriculteurs ne sont pas en effet des individus connaissant isolés. Il nous semble alors important de faire apparaître la façon dont les agriculteurs, en échangeant des informations, en élaborant ensemble des connaissances et en déléguant à d'autres certaines tâches d'invention ou d'appréciation, opèrent collectivement pour, tout en gardant la maîtrise de leur pratique, s'engager dans la mise en œuvre de façons de faire respectueuses de l'environnement. Nous nous intéressons donc à la façon dont la connaissance nécessaire à la mise en œuvre de changements sur l'usage des herbicides est assurée plus ou moins collectivement en fonction des dialogues qu'entretiennent les individus entre eux dans leur activité<sup>1</sup>. Nous allons nous appuyer pour montrer cela sur un travail réalisé en 2002 et 2003 auprès des viticulteurs d'une commune de la côte chalonaise en Saône et Loire, la commune de Buxy.

#### *La forme du réseau de dialogues professionnels*

Que constate-t-on sur cette commune ? Que le réseau formé par tous les dialogues que les uns entretiennent avec les autres prend la forme d'une étoile (Figure 12). On parlera du noyau du réseau, en se référant aux viticulteurs qui sont le plus fortement en lien entre eux (13, 19, 20, J1 et J2), des viticulteurs de la périphérie lorsqu'il s'agira des viticulteurs les plus isolés (10, 12, 15, 18, 21 et 22), et

<sup>1</sup> Pour plus de détails, voir Compagnone (2004).

de la zone intermédiaire pour les viticulteurs placés entre ces deux zones (11, 14, 16 et 17). En s'intéressant aux relations établies avec des viticulteurs hors du réseau considéré, on constate que les viticulteurs du noyau sont ceux qui possèdent le plus grand nombre de relations (de quatre à cinq), en dehors du réseau considéré, avec d'autres viticulteurs, principalement de communes de la côte chalonnaise. A l'opposé, les viticulteurs de la périphérie sont ceux qui en possèdent le moins. Bien sûr, les autres viticulteurs ne sont pas les seules personnes à intervenir dans les débats techniques locaux. Différents techniciens travaillant pour les fournisseurs (coopératives d'approvisionnement ou entreprises privées), pour la Chambre d'agriculture ou pour la cave coopérative apportent aux viticulteurs des informations, des conseils techniques et une aide à la décision (Figure 13). Le conseiller de la Chambre d'agriculture est très présent sur Buxy. Les deux tiers des viticulteurs font appel à lui pour un appui technique. Les quelques viticulteurs (10, 14, 21, 22) qui considèrent les deux types de conseils, celui de l'agrofourniture et celui de la Chambre, comme étant tout aussi important l'un que l'autre pour l'orientation de leur pratique, se situent principalement dans la périphérie. De même, en ce qui concerne l'appui du technicien de la cave<sup>2</sup>, les trois viticulteurs (16, 18, 22) qui le considèrent comme n'étant pas secondaire sont encore essentiellement dans la périphérie. A l'opposé, les membres du noyau et du reste de la zone intermédiaire bénéficient individuellement d'une moins grande diversité de conseil : mis à part (20), ils ne sont en lien qu'avec un seul l'agent de l'agrofourniture et ils accordent une préférence à l'un ou à l'autre des conseils, celui de l'agrofourniture ou celui de la Chambre, mais pas aux deux à la fois.

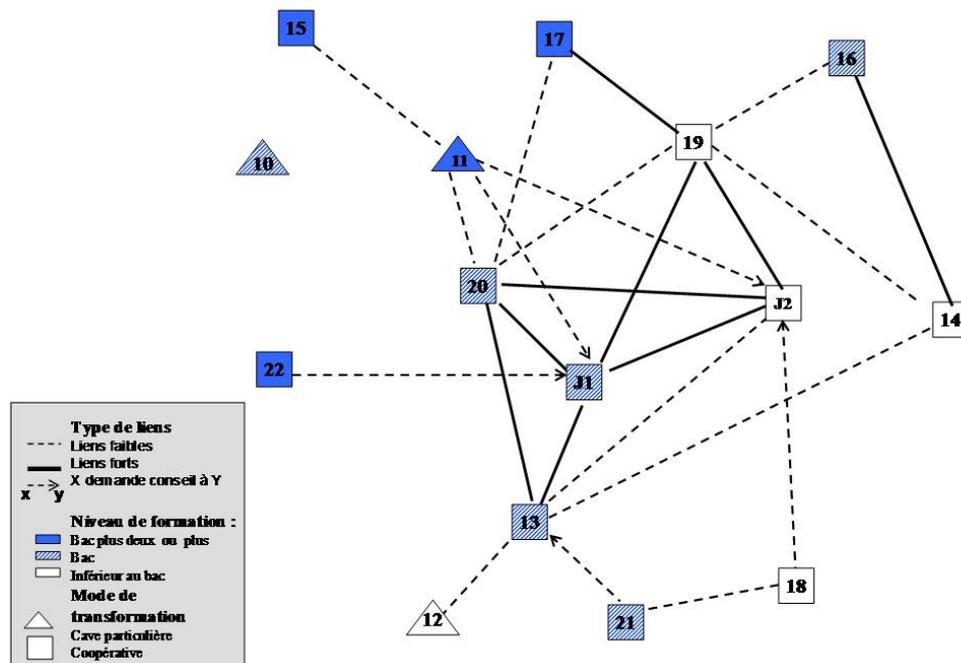


Figure 12 : Réseau de dialogue sur les pratiques viticoles des viticulteurs de Buxy

<sup>2</sup> Mis à part J1, tous les viticulteurs en cave disent en bénéficier.

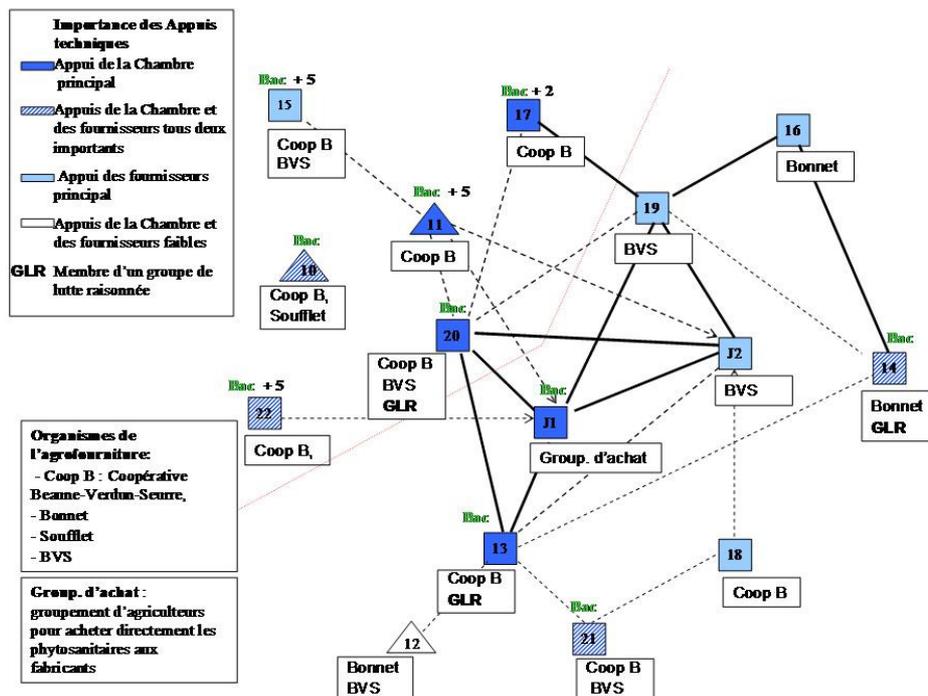


Figure 13 : Les différents réseaux de conseils dont bénéficient les viticulteurs

Il apparaît donc que :

- 1) les membres de la périphérie compensent leur manque d'accès à des connaissances locales par des dialogues avec d'autres viticulteurs en s'appuyant beaucoup plus sur le conseil technique,
- 2) dans le noyau, alors que l'on aurait pu s'attendre à ce que ses membres profitent du même type de conseil, toute la diversité du conseil disponible sur la zone est représentée. Des ressources spécifiques semblent donc y être apportées par les différents viticulteurs qui le composent et être partagées par le biais des échanges que les uns et les autres y entretiennent, comme si le noyau s'était constitué sur la base de l'accessibilité de ce petit collectif à l'ensemble des ressources cognitives disponibles sur la zone.

### La dynamique de changements

Les principaux thèmes techniques qui font l'objet de préconisations spécifiques de la part de l'encadrement technique dans le cadre de la mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement, et sur lesquels les entretiens ont plus particulièrement porté, sont la couverture phytosanitaire des vignes, les travaux d'entretien du sol et la fertilisation. Comment s'opère alors la dynamique de changement au sein de ce réseau ? Cette dynamique s'opère principalement du noyau vers la périphérie pour ces différentes pratiques, marquant ainsi l'importance des dialogues noués entre les individus. C'est dans cette partie du noyau que les changements sont initiés et argumentés, pour s'étendre ensuite au reste du réseau, comme en témoignent les dates, effectives ou envisagées, d'adoption. Ainsi en matière de produits de pré-levée (Figure 14), quatre viticulteurs, tous membres du noyau, en ont abandonné l'usage (13, 19, 20, J2). C'est parmi ces viticulteurs que l'on trouve ceux qui



désherbants il y a une trentaine d'années, et considérée, il y a encore peu de temps, comme un indicateur de manque de technicité des viticulteurs – plutôt âgés et dans des petites structures - qui continuaient à l'utiliser, elle se trouve aujourd'hui "réhabilitée" et remise au goût du jour par cette même culture technique technicienne. Une requalification des façons de faire des viticulteurs, et par là, des viticulteurs eux-mêmes, s'opère. Ceci ne va pas forcément de soi. Ceux qui étaient localement considérés comme les moins performants techniquement maîtrisent cette technique contrairement à ceux identifiés comme les plus techniciens. Et par cette maîtrise spécifique, ils possèdent une ressource « utile » au reste du réseau. De fait, on constate que la réintroduction de cette pratique dans le noyau du réseau s'opère par des individus de ce noyau directement connectés avec des viticulteurs de la périphérie qui ont conservé cette pratique et la maîtrise qui lui est associée (cas de 12 et 21). « Retardataires » dans une classification ordinaire d'une approche diffusionniste des innovations, ils se trouvent, du fait de ce retournement de situation comme des « pionniers » en ayant assumé un rôle de conservation des pratiques. Pour autant, cette conservation n'est pas pensée en tant que telle et le rôle attendant à cette conservation n'est pas socialement reconnu dans sa spécificité. Ces viticulteurs ne se retrouvent pionniers que par accident, de manière très passagère.

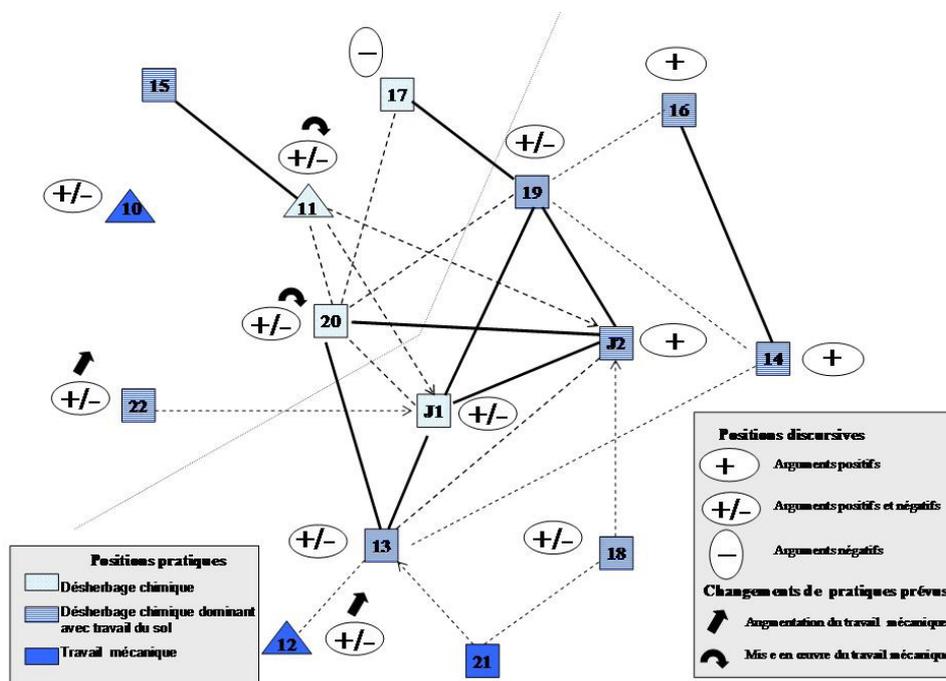


Figure 15 : Mise en œuvre du travail mécanique du sol

Si, à première vue, il semble que l'on puisse tenir à peu près le même type de raisonnement sur la pratique de l'Enherbement Naturel Maîtrisé, une attention plus grande laisse apparaître une situation plus complexe (Figure 16). En effet, qu'observe-t-on sur cette question ? Une dynamique de changement qui prend une forme plus éclatée et qui part d'une partie du noyau vers une partie de la périphérie. S'il en est ainsi, à notre sens, c'est que cette technique, bien qu'elle lui soit très liée, n'a pas tout à fait le même statut que celle du désherbage mécanique. En effet, si ce désherbage a été considéré, jusqu'à sa requalification technicienne comme une forme dépassée de maîtrise des herbes dans les vignes, par contre, la présence d'herbe a toujours été, elle, tout simplement le signe d'un manque de maîtrise. Nous n'avons donc pas affaire ici à une simple requalification d'une technique, au sens où nous l'entendions précédemment, mais bien plutôt d'une nouvelle technique qui vise à produire une situation identique à celle d'un « l'enherbement par négligence » d'une vigne comme cela pouvait être observé antérieurement chez certains viticulteurs qui « s'occupaient mal de leurs vignes ». La mise

en œuvre d'une telle pratique demande une grande technicité, qui n'est, à vrai dire, aujourd'hui complètement maîtrisée par personne, les conditions d'utilisation de cet enherbement restant même débattues par le milieu de l'encadrement technique. Cette situation explique donc le moindre investissement dans ce type de changement, d'autant plus qu'un désherbage mécanique un peu plus intensif peut permettre de se passer de désherbant et d'enherbement. On remarquera alors que les choix techniques différents sont donc faits au sein du noyau par les viticulteurs en y éprouvant les deux techniques possibles alternatives à l'usage de désherbant.

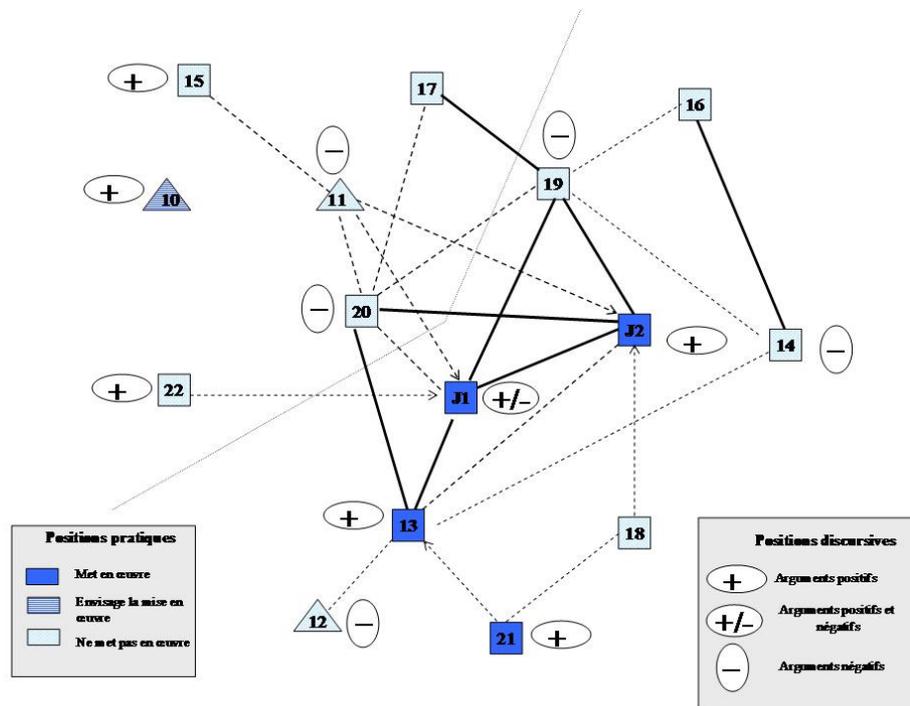


Figure 16 : L'Enherbement Naturel Maîtrisé

### Quels enseignements sur le partage des connaissances ?

Lorsqu'on s'intéresse à l'articulation des différentes positions, on voit que, localement, les nombreux changements relevés, et qui vont dans le sens de la mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement, sont principalement « portés » par les viticulteurs du noyau. C'est là que l'on trouve les individus qui les mettent en premier en œuvre ou ceux qui argumentent positivement pour leur développement. L'accès aux « nouvelles » techniques nécessite pour les viticulteurs de s'informer sur ce qui se fait ou, dans un contexte de forte injonction technique, sur ce qui doit se faire, et de développer une nouvelle maîtrise des choses. Cette démarche est collectivement soutenue par la densité des interactions langagières qu'ils entretiennent entre eux, au sein du noyau, et avec d'autres à l'extérieur du réseau. Toutefois, selon les thèmes, les membres concernés dans ce noyau ne sont pas toujours les mêmes : on trouve des « spécialistes » par thème technique (usage des produits phytosanitaires, travail du sol, enherbement naturel maîtrisé). Nous n'avons donc affaire ni à une situation où la connaissance est globalement détenue par un seul individu, ni à une situation où elle est partagée, mais bien à une situation où elle est distribuée entre les différents membres. Ce qui rend bien compte de positions argumentatives et pratiques des uns et des autres différentes selon les thèmes.. De la même façon, nous avons pu voir que toute la diversité du conseil disponible sur la zone est représentée dans le noyau. Si personne ne possède tous les conseils techniques, tous peuvent avoir accès indirectement aux différentes informations véhiculées par l'intermédiaire des liens établis entre chacun d'entre eux. Il semble donc qu'un élément de structuration du noyau du réseau soit précisément

la capacité collective qu'il offre, aux uns et autres, à partir de l'expertise et des ressources qu'ils apportent, de gagner en capacités d'agir.

Les travaux que nous avons commencés à mener en grandes cultures<sup>3</sup> sur les réseaux de dialogues professionnels d'agriculteurs engagés dans des changements de pratiques pour la mise en œuvre d'une protection intégrée des cultures, font apparaître, de la même façon, les ressources sociales sur lesquels ces agriculteurs s'appuient pour mener à bien leurs changements. Sur 3 zones des départements de la Nièvre, de l'Yonne et de la Saône-et-Loire, nous avons identifié ces réseaux à partir des relations d'agriculteurs impliqués dans le réseau d'essais « Plus d'agronomie, moins d'intrants » des Chambres d'Agriculture. Les réseaux qui apparaissent alors sont à chaque fois principalement constitués de plusieurs membres de GDA, de CETA ou de groupes équivalents, qui entretiennent entre eux des relations régulières. A partir des formes différentes de ces réseaux, nous identifions les changements de pratiques mis en œuvre, les individus qui les portent et les débats qui peuvent avoir cours sur ces changements pour comprendre comment s'opèrent les changements de pratiques en fonction des échanges entre les agriculteurs. Si l'analyse reste à achever, on constate toutefois que les questions d'usage des phytosanitaires se trouvent largement prises en charge par les conseillers des groupes de développement auxquels ces agriculteurs appartiennent et semblent faire peu l'objet de discussions entre les agriculteurs. Ceci n'est pas le cas de la mise en œuvre du travail simplifié du sol qui, faiblement prise en charge par l'encadrement, fait l'objet d'un grand intérêt. C'est à travers ce thème qu'apparaissent les questions de maîtrise des adventices.

## Conclusion

L'articulation des approches agronomique et sociologique des pratiques des agriculteurs nous semble constituer un véritable enjeu pour la compréhension des manières et des conditions de changement des façons de faire des agriculteurs. Si les deux approches présentées ici révèlent des éléments qui interviennent dans le raisonnement des agriculteurs sur l'orientation de leur pratique, un travail de mise en perspective reste à faire. Pour autant, chacune d'elles fournit des éléments pour saisir comment s'opèrent les choses, que ce soit en situation d'adaptation « ordinaire » des pratiques pour les ajuster à des conditions toujours variables ou en situation de changement où tous les repères classiques font défaut et sont à redéfinir. Nous voudrions souligner que le fait de nous appuyer sur des graphes pour rendre compte de ces éléments n'est pas dû à une coquetterie intellectuelle. Si nous déployons cette « raison graphique » (Goody, 1979), c'est que cette dernière nous paraît être particulièrement pertinente dans une démarche de recherche-intervention où il s'agit de permettre aux opérateurs eux-mêmes, conseillers ou agriculteurs, de gagner en réflexivité sur ce qu'ils font. C'est ce que nous ont montré les différentes restitutions que nous avons pu faire de ces travaux auprès de ces acteurs.

**Remerciements :** *Pour la partie agronomique, les enquêtes de 2005 en Rhône-Alpes et Pays de Loire ont été réalisées par Pauline Baudhuin, Cécile Chaput, Emmanuel Frouin, Clotilde Gardin, Agathe Le Gloanic, Clélia Lericolais, Marion Limelette, Isabelle Maes, Pauline Marlier, Thomas Pollet, Caroline Wathy (DAA AGRECINA), sous la direction de Françoise Coste (ESA Angers) et Joséphine Peigné (ISARA Lyon). Celles de 2006 l'ont été par Armelle Avisse, sous la direction de Michel Brochard (ITL). Les données sociologiques sont issues d'un travail d'enquête réalisé, sous notre direction, par un ingénieur ITA, M.J. Pull, dans le cadre de son mémoire de fin d'études effectué au laboratoire LISTO de l'INRA/SAD, données que nous avons ensuite précisées par une deuxième phase d'enquête réalisée par nos soins.*

---

<sup>3</sup> Travaux menés dans le cadre du projet ANR Gédupic avec Florence Hellec

## Références bibliographiques

- Alter N., 2000, L'innovation ordinaire, Paris, PUF, 280 pages
- Bouvier A., Conein B., (Eds.) 2007, L'épistémologie sociale, une théorie sociale de la connaissance, Paris, EHESS, *Raisons Pratiques* 17, 320 pages
- Cerf M., 1996a. Approche cognitive de pratiques agricoles : intérêts et limites pour les agronomes. *Nature, Sciences, Sociétés* 4, 327-339.
- Cerf M., 1996b. Les connaissances mobilisées par les agriculteurs pour la conception et la mise en œuvre de dispositifs d'intervention culturale. *Le travail humain* 59, 305-333
- Cerf M., Sébillotte M., 1997. Approche cognitive des décisions de production dans l'exploitation agricole, *Economie rurale* 239, 11-18.
- Compagnone C., 2004. Agriculture raisonnée et dynamique de changement en viticulture bourguignonne. *Recherches Sociologiques* 2004/3, 103-121
- Conein B., 2005. Les sens sociaux, trois essais de sociologie cognitive. Paris, *Economica*, 197 pages
- Darré J.P., 1994. Pairs et experts dans l'agriculture. Dialogues et production de connaissance pour l'action, *TIP*, volume 12, n°1.
- Degenne A., Forsé M., (Eds.) 1994. Les réseaux sociaux. Une analyse structurale en sociologie. Paris, Armand Collin. 263 pages
- Goody J., 1979. La raison graphique, la domestication de la pensée sauvage, Paris, Les éditions de minuit, 275 pages
- Lazega E., 2001. The Collegial Phenomenon. The Social Mechanisms of Cooperation among Peers in a Corporate Law partnership, Oxford, Oxford University Press. 346 pages.
- Macé K., Morlon P., Munier-Jolain N., Quéré L., 2007. Time scales as a factor in decision making by French farmers on weed management in annual crops. *Agricultural Systems* 93, 115-142.
- Morlon P., Sigaut F., 2008. La troublante histoire de la jachère : pratiques des cultivateurs, concepts de lettrés et enjeux sociaux. Quae, Versailles & Educagri Editions, Dijon, 325 pages.

## **RMT « Gestion de la flore adventice en grandes cultures »**

**A. Rodriguez<sup>1</sup>, J. Gasquez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>: ACTA, Station inter-instituts, 31450 Baziege

<sup>2</sup>: INRA, Unité Mixte de Recherche n°1210, INRA, Univ. Bourgogne, ENESAD, Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon cedex

Correspondance : Jacques.Gasquez@dijon.inra.fr

### **Résumé**

La réglementation sur l'utilisation de produits phytosanitaires en général et des herbicides en particulier se fait plus sévère et modifie fondamentalement les stratégies de désherbage en remettant à l'ordre du jour les bases agronomiques de gestion de la flore et les techniques alternatives au désherbage chimique. Il semble indispensable d'accompagner les agriculteurs dans la recherche de voies innovantes de gestion de la flore et d'identifier les problèmes posés par les systèmes de culture actuels ou à venir. Dans cet objectif les acteurs de l'axe recherche-développement-enseignement ont saisi l'opportunité qui leur était offerte par la Mission DAR de renforcer les partenariats pré-existants et d'étendre leurs collaborations. Le RMT Gestion de la Flore Adventice en Grandes Cultures est né de cette volonté en septembre 2007, et associe la recherche publique (INRA, ENESAD), les instituts et centres techniques (ACTA, Arvalis Institut du Végétal, CETIOM, ITAB, ITB, ITL), les chambres d'agriculture (CA33, CA51) et l'enseignement agricole (EPLFPA de Vesoul, ENESAD) sur 3 axes de travail. Le développement de nouveaux outils de gestion de la flore adventice, un état des lieux sur les pratiques et itinéraires de désherbage, et une large diffusion des informations (site web et modules de formation ouverte à distance) forment les 3 axes actuellement privilégiés.

### **Abstract**

The regulation of the pesticide use and particularly the herbicide use is getting more restrictive. Thus it will deeply modify the weed control strategies promoting more agronomic involvement in weed control and alternative methods to the chemical control. Farmers must be supported in the search for innovating ways of weed control. It is necessary to identify questions raised by present and on-coming cropping systems. Thus members of the research-development-teaching chain took advantage of the offer of the "Mission DAR" in order to strengthen the existing partnership and extend their cooperation. So the "RMT Gestion de la Flore adventice en Grandes Cultures" (weed management in major crops) has been set up in September 2007 bringing together a public research institute (INRA), technical institutes (ACTA, Arvalis Institut du Végétal, CETIOM, ITAB, ITB, ITL), chambers of agriculture (CA33, CA51) and agricultural education (EPLFPA de Vesoul, ENESAD) with three working themes: inventory of the weed control techniques, development of new weed management tools and a broad dissemination of information through a web site and teaching modules for weed science.

---

### **Introduction**

Avant tout soucieux de la rentabilité économique de son exploitation, l'agriculteur a aujourd'hui pour mission de fournir un produit de qualité en préservant le milieu afin de répondre aux besoins croissants d'un contexte socio-économique et réglementaire plus exigeant. Le raisonnement de ses choix techniques et notamment des interventions phytosanitaires doit désormais s'inscrire dans une logique

de durcissement de la pression législative. Ainsi, depuis 1991, la directive européenne 91/414CEE a pour but d'harmoniser l'ensemble des différentes réglementations et autorisations de produits phytopharmaceutiques des états membres au sein de l'Union Européenne. Mais elle est source d'une inexorable réduction de la gamme des matières actives disponibles - soit que leurs propriétés physico-chimiques ne sont plus en accord avec le cahier des charges européen soit qu'elles sont simplement abandonnées pour des raisons économiques par les firmes phytosanitaires. Plus récemment, en 2007, l'engagement n°129 du Grenelle de l'environnement et le plan Ecophyto 2018 ([agriculture.gouv.fr](http://agriculture.gouv.fr)) visent une réduction de 50% des usages des pesticides dans un délai de 10 ans « si possible » ainsi que des réductions d'usage pour 53 molécules classées comme les plus dangereuses. A cela, s'ajoute un ralentissement sans précédent dans les innovations sur les herbicides. Sur les vingt modes d'action herbicides homologués, un seul a été trouvé au cours des quinze dernières années (Ruegg *et al.*, 2007). Il apparaît moins de molécules qu'il en disparaît. Dans les dernières vingt cinq années, sans parler des évolutions touchant le matériel agricole, seules deux avancées techniques sont apparues en matière de désherbage. En premier lieu, la découverte des sulfonilurées qui a permis de réduire considérablement la quantité de matières actives appliquées à l'hectare : de quelques kilogrammes ou centaines de grammes, nous sommes passés à des dizaines de grammes voire moins. Et dernièrement sont apparues les cultures tolérantes aux herbicides obtenues par sélection naturelle (imidazolinones / Clearfield® : maïs, blé, soja, tournesol...) ou génétiquement modifiées (glyphosate/ Round Up : maïs, soja, blé...) mais objets d'un moratoire. A cette diminution drastique des solutions techniques phytosanitaires, s'ajoute une réglementation plus sévère des pratiques de désherbage : selon les familles chimiques, il s'agit de limitation annuelle à la parcelle du nombre d'applications (une seule dose homologuée de sulfonilurées par an) ou de réduction du grammage total inférieure à la dose homologuée (urées substituées, glyphosate). Ces restrictions sont directement liées à la présence constatées de ces mêmes molécules dans les eaux souterraines ou les eaux de surfaces mais aussi en relation avec l'accroissement du nombre de populations adventices devenues résistantes à ces herbicides.

On assiste ainsi à une profonde mutation du concept de désherbage qui incite à développer des schémas de raisonnement plus larges réintégrant pleinement les bases agronomiques de gestion des populations adventices (rotation, travail du sol, dates de semis,...) et les techniques alternatives ou complémentaires au désherbage chimique, qui, si elles ne peuvent se substituer au désherbage chimique, constituent autant d'interventions supplémentaires dans une parcelle (accroissement du temps de travail et coût énergétique). D'autre part, pour des raisons économiques mais également environnementales (soutien du Ministère de l'environnement : MEDDAT), se développe une agriculture fondée sur la réduction du travail du sol avec le semis direct. Dans ce cas, la gestion des adventices fait donc majoritairement appel à des applications d'herbicides notamment dans l'interculture. Si pour des raisons diverses il faut réduire fortement le recours aux herbicides quantitativement et qualitativement et parallèlement chercher à ne perturber qu'au strict minimum la structure du sol, on se prive des principaux moyens de gestion des adventices dans les grandes cultures. Cette situation constitue un dilemme pour les agriculteurs qui ont besoin de solutions viables pour s'assurer des revenus décents, continuer à produire suffisamment et viser une gestion durable de la biodiversité (Gasquez *et al.*, 2008).

### **Renforcer les partenariats préexistants et étendre les collaborations aux différents acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole**

Cette nouvelle donne impose aux acteurs de la recherche, du développement mais aussi de l'enseignement de collaborer de manière plus étroite, plus systématique et plus intense pour dépasser la structuration par filières et apporter de réelles innovations.

Ainsi la structure de RMT a été officialisée en 2006 (Journal Officiel) dans le but de favoriser les relations entre les différents acteurs. L'activité d'un RMT doit se traduire par des productions propres d'intérêt collectif scientifiques et techniques pour un usage opérationnel, l'élaboration et l'actualisation d'outils et de méthodes à caractère collectif, la co-construction de projet de recherche finalisée et de développement ainsi que la formulation de questions à la recherche publique. Ces productions devront être valorisées par la rédaction de manuels, l'élaboration et la coordination d'outils d'appui technique à l'usage des opérateurs économiques, des programmes de formation et des actions de communication, de dissémination, de transfert.

Concernant la gestion de la flore adventice en grandes cultures, plusieurs organismes (ACTA, Arvalis Institut du Végétal, CETIOM, INRA) avaient depuis plusieurs années des relations plus ou moins régulières et soutenues. Celles-ci s'étaient notamment déjà concrétisées par un projet financé par le COST ACTA puis par le CASDAR dans le but de développer un modèle à critères multiples et pondérables simulant les effets des systèmes de culture sur l'évolution des infestations, base de l'élaboration d'un outil d'aide au choix stratégique du désherbage (DECID'HERB) et d'un modèle simulant la dynamique du peuplement adventice pour optimiser les processus de prise de décision concernant la lutte contre les adventices (FLORSYS) (Munier-Jolain *et al.*, 2006). Pour accroître la synergie et renforcer les relations jusqu'alors trop limitées entre les acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole, ils ont saisi l'opportunité qui leur était offerte par les structures nouvelles de RMT de renforcer leurs liens préexistants et d'élargir leur groupe à des organismes de développement, les chambres d'agriculture (CA33, CA51) et à l'enseignement agricole (EPLEFPA de Vesoul, ENESAD). Délibérément novatrice, cette collaboration ne se cantonne pas seulement à l'axe classique étroit par filière dans un type d'agriculture donné mais elle ambitionne de rapprocher différents acteurs de systèmes de production agricole *a priori* divergents (agriculture traditionnelle / agriculture biologique - association de l'ITAB au projet) (Rodriguez, 2004 ; Julien, 2000 ; Paulhe, 1997) sur une problématique centrale : la gestion de la flore adventice en grandes cultures dans le cadre des exigences nouvelles. La formalisation d'un partenariat sous forme d'un RMT a vu le jour en septembre 2007 (mais n'a réellement démarré qu'au printemps 2008) sous l'égide de l'ACTA avec l'appui financier du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche par l'intermédiaire de la Mission DAR. Le RMT Gestion de la Flore Adventice en Grandes Cultures associe sur des projets communs la recherche publique (INRA ENESAD), les instituts et centres techniques (ACTA, Arvalis Institut du Végétal, CETIOM, ITAB, ITB, ITL), les chambres d'agriculture (CA33, CA51) et l'enseignement agricole (EPLEFPA de Vesoul, ENESAD). Ce RMT est co-animé par l'ACTA et la Chambre d'Agriculture de la Gironde.

La mise en commun de moyens et de compétences est incontestablement la stratégie la plus efficace pour répondre aux questions de développement transverses et pour favoriser la concertation sur le transfert et la diffusion d'informations. Elle ouvre des perspectives pour la mise en place de réseaux multi sites d'expérimentation, dans l'analyse multicritères de systèmes de production, la standardisation des approches et des méthodes d'investigation ou la réalisation d'enquêtes génériques sur les pratiques de gestion de la flore adventice (lutte phytosanitaire *sensu stricto*, règles de décisions, gestion de l'interculture....), pour réaliser un état des lieux du salissement à l'échelon régional et/ou national.

## **Revenir aux fondamentaux pour anticiper les évolutions**

Développer de nouveaux outils de gestion de la flore adventice passe par la compréhension du fonctionnement des communautés végétales au champ et l'anticipation des évolutions à venir tant dans la composition de la flore hébergée par une parcelle ou un territoire (qualitatif) que dans la dynamique démographique des infestations (quantitatif).

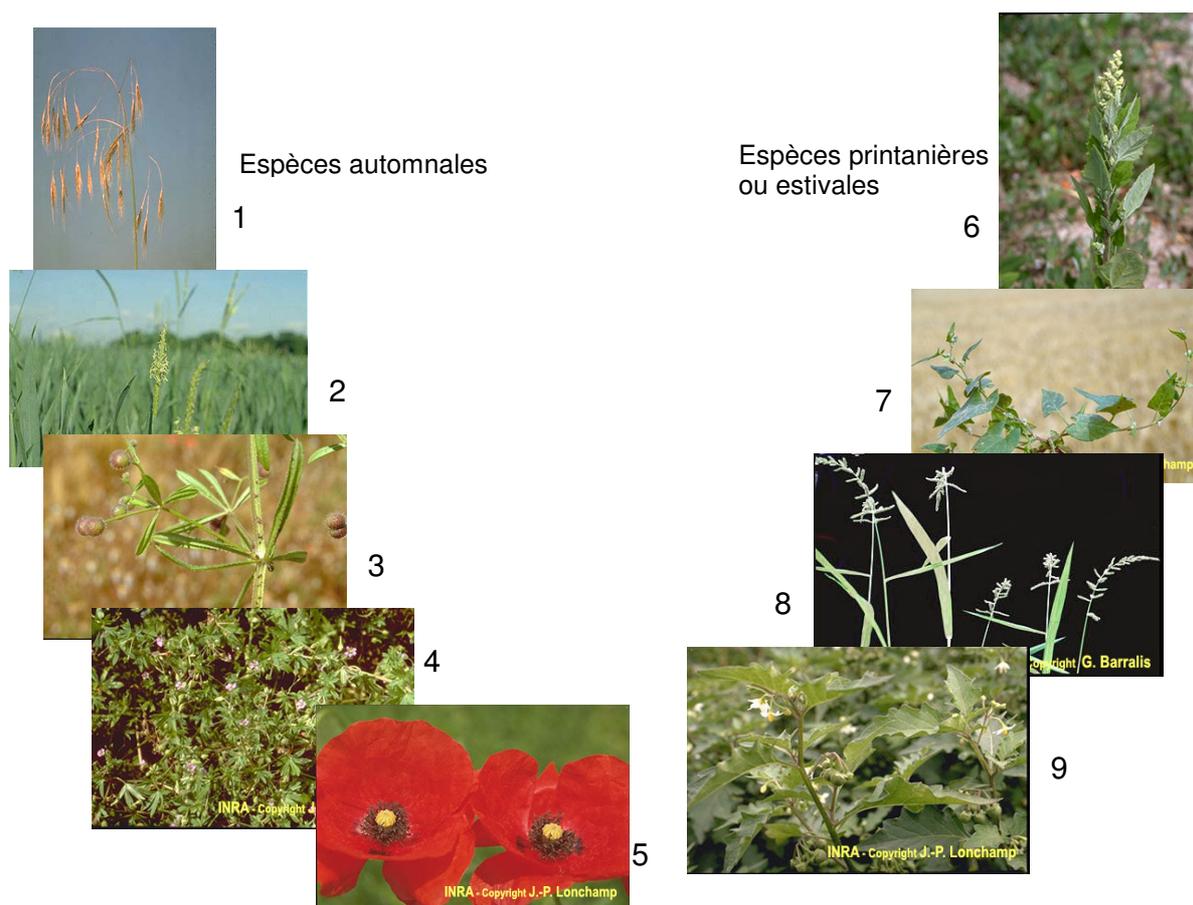
La gestion intégrée de la flore ne peut s'envisager sans une connaissance approfondie des caractéristiques biologiques majeures (traits de vie) des espèces en relation avec le milieu permettant leur développement. Malheureusement, celle-ci est loin d'être assez avancée à la fois sur chaque espèce et aussi par le nombre d'espèces actuellement documentées. Il s'agira donc en priorité de collecter et de synthétiser les informations existantes puis, face aux disparités constatées de tenter d'acquiescer les informations manquantes. Une base de données, BADOMA (BAsE de DONnées des MAuvaises herbes), conçue pour être accessible via Internet, a été initiée au sein de l'UMR Biologie et Gestion des Adventices de Dijon. Une première version est accessible via le site Internet de l'unité à l'adresse suivante : <http://www2.dijon.inra.fr/bga/badoma/presentation/index.htm>. Mais cette version reste notoirement incomplète du fait de la rareté des informations sur la biologie de nombreuses espèces adventices. Plusieurs chantiers sont ouverts : une amélioration de la facilité d'utilisation (ergonomie) ; un ensemble minimum de caractères doit être retenu pour alimenter les modèles comme FlorSys. Les partenaires du RMT se sont fixés comme premier objectif d'enrichir BADOMA à partir d'études bibliographiques non encore répertoriées et surtout de mener des travaux expérimentaux de suivi de phénologie pour compléter BADOMA et assurer la fiabilité des données sur les caractères retenus

Cependant, il ne sera pas possible de travailler sur toutes les espèces à la fois. L'ensemble des partenaires ont défini une liste de neuf espèces (liste A) particulièrement importantes et représentatives d'une certaine diversité sur lesquelles les traits de vie retenus seront mesurés dans un grand nombre de situations environnementales. Une liste B complémentaire est également proposée afin d'intégrer soit des spécificités régionales soit d'autres adventices possédant des spécificités particulières (envahissantes par exemple).

**Liste A** (Figure 1) : **Graminées automnales** : Brome stérile, Vulpin des champs (espèces majeures représentatives des problèmes des graminées adventices en cultures d'hiver et en particulier les céréales) ; **Graminées estivales** : Panic pied-de-coq (espèce modèle des graminées estivales qui colonisent toutes les cultures d'été) ; **Dicotylédones automnales** : Gaillardet gratteron, Coquelicot (espèces importantes dans les céréales d'hiver), Géranium à tiges grêles (espèce représentative des espèces spécifiques du colza) ; **Dicotylédones printanières** : Chénopode blanc, Renouée liseron (espèces modèles des espèces à levée printanière colonisant tout type de culture) ; **Dicotylédone estivale** : Morelle noire (espèce caractéristique des cultures estivales)

**Liste B** : Moutarde des champs, Anthriscus sylvestre, Amaranthe réfléchi, Ammi élevé, Ambrosie à feuilles d'Armoise (espèce envahissante particulièrement surveillée), Ambrosie trifide (espèce envahissante à surveiller), Mercuriale annuelle, Matricaire camomille, Datura stramoine, Renouée persicaire, Véronique à feuilles de Lierre, Sicyos anguleux (espèce envahissante à surveiller), Ray-grass sp....

Parallèlement, il est nécessaire aussi de chercher à savoir comment les agriculteurs formalisent la gestion des adventices, les raisons qui déterminent leurs choix de cultures, de programmes de désherbage, mais aussi les modifications possibles de leur stratégie si les conditions devaient changer. Dans ce but, nous préparons un questionnaire qui sera utilisé par les techniciens des chambres pour enquêter un échantillon d'agriculteurs sur tout le territoire. Par retour, il faut aussi pouvoir leur montrer, le cas échéant, les erreurs et les points qui peuvent être améliorés.



**Figure 1** : espèces de la liste A : 1 : Brome stérile, 2 : vulpin, 3 : gaillet grateron, 4 : géranium à tige grêle 5 : coquelicot, 6 : chénopode blanc, 7 : renouée liseron, 8 : panic pied de coq, 9 : morelle noire.

## Peut-on accompagner les agriculteurs vers des voies innovantes de gestion de la flore ?

La diminution de la gamme herbicide et le renforcement de la législation amènent inévitablement à des impasses techniques ou à des modifications profondes de la flore. Parmi les nombreux exemples, citons le retrait des triazines ayant pour conséquence directe une forte augmentation du coût de désherbage en maïs d'environ 30% liée à la nécessité de multiplier les traitements avec des produits au spectre moins large. Le retrait de la trifluraline conduit à une réduction voire une impossibilité du contrôle des graminées en production d'avoine et un usage accru d'antigraminées foliaires (fops et dimes) dans les cultures de soja, tournesol, colza, pois et féverole. La limitation d'usage de l'isoproturon et du chlortoluron en céréales d'hiver contribue à renforcer le recours aux antigraminées foliaires favorisant ainsi l'apparition de résistances. La gestion des populations résistantes aux fops, dimes en sera logiquement plus complexe et demandera un monitoring rigoureux au risque de voir disparaître les rares solutions herbicides par la sélection rapide de nouvelles résistances (aux sulfonilurées).

Comme nous l'avons vu précédemment, la réduction des intrants de 50% de pesticides d'ici à 2018 nécessitera un effort sans commune mesure de l'ensemble de la profession pour accompagner les producteurs dans cet objectif. Faut-il réduire les doses au risque de favoriser le développement des populations résistantes ? Réduire le nombre de traitements en introduisant des méthodes alternatives au désherbage chimique et réorganisant de manière profonde son exploitation, s'équiper et prévoir de la main d'œuvre supplémentaire, voire accepter d'augmenter les émissions de CO<sub>2</sub> ? Est-il possible de réduire simplement en recherchant des molécules utilisables à doses encore plus basses ? La situation actuelle de



données sur l'efficacité de ces techniques) ainsi que les conséquences prévisibles d'une impasse de désherbage. Chaque programme candidat est constitué d'une combinaison de 0 à 3 interventions individuelles de désherbage, chaque intervention étant caractérisée par un stade de la culture, et, le cas échéant, par la dose du produit herbicide utilisé. Les programmes sont générés automatiquement par le logiciel par combinatoire systématique des différentes interventions potentielles consignées dans les bases de données du logiciel. Après avoir classé les espèces selon le risque qu'elles représentent, DECID'Herb classe les stratégies de désherbage candidates selon les critères suivants :

**Efficacité** : L'efficacité d'un programme sur la flore adventice présente ou attendue sur la parcelle est déterminée par l'efficacité attendue sur chacune des espèces listées, avec un poids plus fort donné aux espèces à fort risque malherbologique.

**Coût de l'intervention** : Dans la version actuelle de DECID'Herb, le coût d'une intervention correspond uniquement au coût des produits, déterminé par les prix d'achat et les doses appliquées.

**Risque écotoxicologique** : Dans la version actuelle, l'indicateur de risque écotoxicologique  $I_{phy}$ , développé par l'INRA de Colmar est utilisé comme critère de risque pour l'environnement. Cet indicateur dépend des caractéristiques écotoxicologiques des substances actives, des caractéristiques des parcelles vis-à-vis des risques de ruissellement et de lessivage, et des conditions de traitement (dose, stade de la culture au moment du traitement...).

**Risque de sélection de résistance** : Une estimation du risque de sélection de résistance est associée à chaque programme herbicide candidat. Ce risque dépend de la fréquence d'utilisation des substances actives du programme candidat (ou de substances actives de même mode d'action) au cours des 4 dernières campagnes, sur les différentes générations de chacune des espèces de l'infestation.

**Organisation du travail** : DECID'Herb tient compte du fait que la période disponible pour l'intervention de désherbage est parfois limitée, et que cela peut poser des problèmes de mise en œuvre.

A partir des informations saisies concernant l'état de la flore sur la parcelle, l'historique de désherbage et le système de culture prévisionnel, DECID'Herb fournit deux types de sorties :

- Un indicateur de risque malherbologique associé à chaque espèce listée ;
- Une liste ordonnée de programmes de lutte satisfaisants, classés dans l'ordre du degré de correspondance au programme 'idéal' en fonction de critères techniques, économiques et environnementaux tels que pris en considération et éventuellement pondérés par l'utilisateur (Figure 3).

A l'heure actuelle, une application WEB est hébergée sur le serveur de l'INRA. Elle est en bêta-test et requiert encore de nombreux ajustements et compléments. Il est notamment nécessaire (i) d'améliorer le module de prise en compte des risques de transfert des résidus d'herbicides et (ii) de progresser dans la qualité et la fiabilité des programmes de lutte retenus afin que les préconisations destinées aux prescripteurs soient reconnues et validées par les partenaires :

- Analyse et intégration des règles d'expertise fournies par ARVALIS pour estimer les risques de transfert associés à une parcelle à une période donnée (en tenant compte notamment du milieu physique, du climat, de la réserve utile du sol, de la présence éventuelle de bandes enherbées,...) ;
- Mise à jour des bases de données 'efficacité des herbicides' et 'Biologie des espèces'.
- Intégration du lin et de la betterave. L'intégration du lin nécessite l'intégration d'une base de données 'herbicides' en cours d'élaboration progressive par l'ITL ainsi que de données sur la phénologie de la culture. L'intégration de la betterave sera plus compliquée, et nécessitera des développements spécifiques.

- Intégration d'éléments d'expertise supplémentaires nécessitant des développements mineurs : (i) prise en compte de la sensibilité de certains herbicides à la teneur en argile, en matière organique, à la présence de résidus végétaux en surface, à l'état du lit de semences ; (ii) prise en compte des résistances déclarées aux herbicides ; (iii) prise en compte de stratégies de prise de risque en début de campagne, potentiellement rattrapable ultérieurement au cours du cycle cultural.



**Version 2**

Choix du Nom

Historique

Recherche dans la base de données

Aide

avec le concours  


Classement des programmes | Nom : SDGI - Site : Epoisses - Parcelle : D1 - Millésime : 2005

Les meilleurs programmes selon DECID'Herb

N°	Programme herbicide	Matière(s) active(s)	Efficacité (entre 0 et 10)	I <sub>phy</sub> (entre 0 et 10)	Nombre de passage	Applicabilité (entre 0 et 10)	Risque de Résistance (entre 0 et 10)	Coût (€/ha)
1	Primus (Nikos) 0,2l/ha + Harmony extra 50q/ha + Cent-7 1l/ha	florasulam(B) + thifensulfuron-méthyl(B), tribénuron-méthyl(B) + isoxaben(K1)	6,99	9,21	2	10,00	0,00	68,97
2	Caméo 30q/ha + Primus (Nikos) 0,2l/ha + Cent-7 1l/ha	tribénuron-méthyl(B) + florasulam(B) + isoxaben (K1)	6,79	9,32	2	10,00	0,00	68,11
3	Primus (Nikos) 0,2l/ha + Caméo 30q/ha + Harmony extra 50q/ha	florasulam(B) + tribénuron-méthyl(B) + thifensulfuron-méthyl(B), tribénuron-méthyl(B)	6,69	9,88	1	10,00	0,00	72,56
4	Primus (Nikos) 0,2l/ha + Cent-7 1l/ha	florasulam(B) + isoxaben (K1)	6,64	9,32	2	10,00	0,00	69,24

I<sub>phy</sub> est un indicateur écotoxicologique développé par l'INRA de Colmar.

Aucun programme compatible avec vos critères n'est suffisamment efficace !

\* Modifiez les critères  
\* Modifiez les paramètres

**Modifier les paramètres**

Priorité à l'environnement : très importante

Coût souhaité du désherbage : 70 €/ha

Nombre maximal d'interventions souhaité :

1  2  2-3  3 ou plus

Type de système de culture souhaité :

Protection intégrée  Protection raisonnée

Valider

**Modifier les critères**

coût (uniquement du ou des herbicide(s) )

efficacité

applicabilité (contraintes organisationnelles)

risque écotoxicologique (Iphy)

risque de sélection de résistance

Valider

[Comparer les résultats avec vos programmes habituels](#)

**Figure 3 :** Exemple de sortie de DECID'herb présentant les meilleurs programmes retenus et leur degré de satisfaction des critères choisis. Il donne aussi la possibilité de modifier les critères de classement et les paramètres

Les développements initialement prévus pour élargir la gamme des préconisations de DECID'Herb (désherbage mécanique, faux-semis, ...) ne pourront être envisagés que dans la mesure où les objectifs correspondant aux quatre points ci-dessus auront été atteints.

Dans le cadre d'un projet financé par le COST-ACTA., plusieurs partenaires terminent une action sur DECID'Herb (31 décembre 2008). Dans le cadre du RMT, il faudra aussi réfléchir à une transmission de l'outil de l'INRA vers les instituts techniques sous forme de constitution d'un groupe d'informaticiens/ingénieurs chargés de la finalisation, du suivi, de la maintenance de l'outil. C'est dans ce type de projet à moyen ou à long terme qu'apparaissent les limites d'un mécanisme de financements programmés sur 3 ans tel qu'il est conçu aujourd'hui. Actuellement, le RMT n'a pas les

moyens financiers de poursuivre le développement de cet outil ; il peut néanmoins jouer son rôle d'expertise dans l'évaluation et l'accompagnement de son transfert vers des partenaires.

### *Le modèle FlorSys*

FlorSys est en cours de développement à l'INRA-Dijon (UMR BGA). Sa structure s'appuie en grande partie sur le modèle AlomySys (Colbach *et al.*, 2007), version monospécifique du modèle développée pour le vulpin.

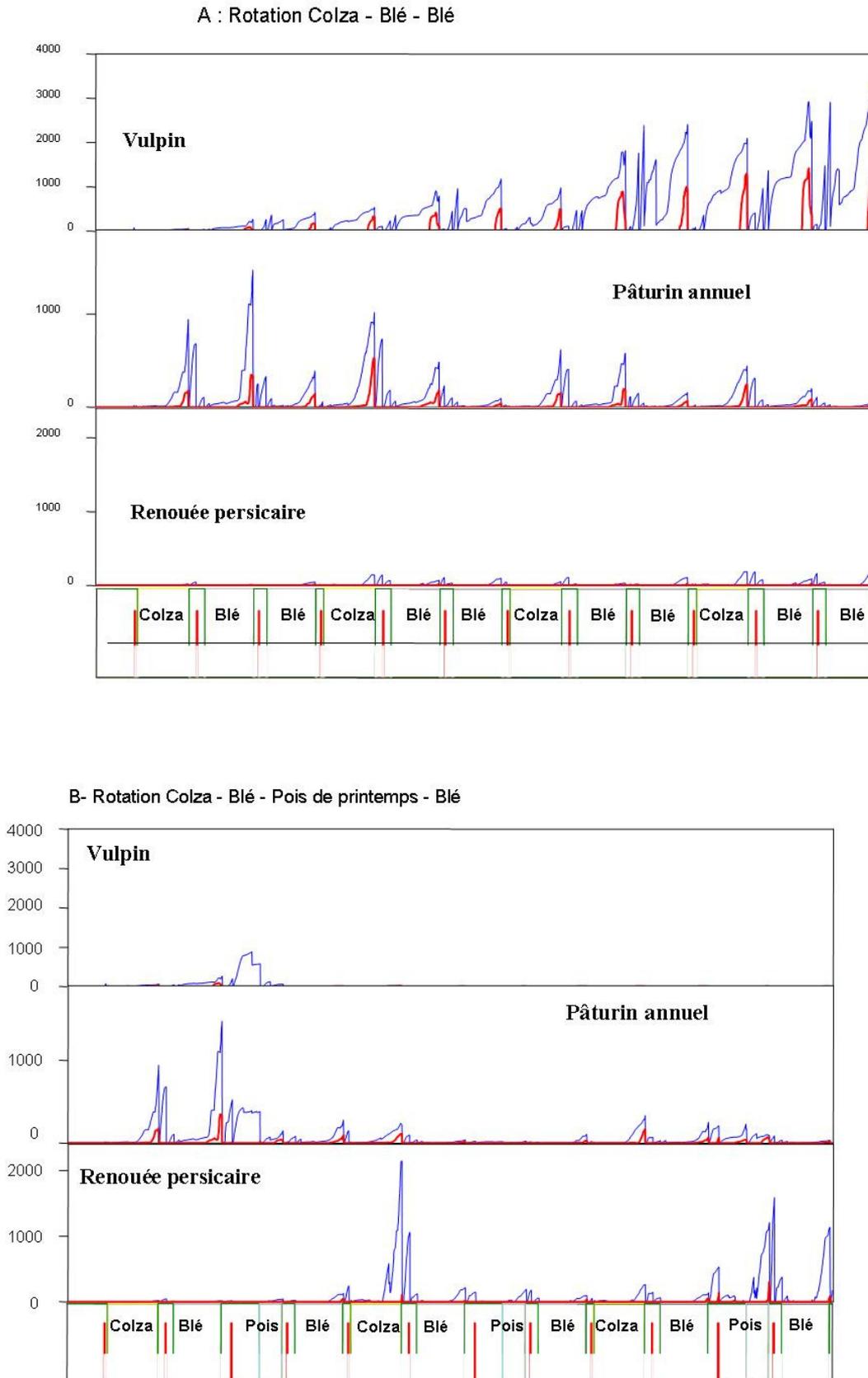
Les variables d'entrée du modèle FlorSys sont de trois types :

- le stock semencier initial, décrit par la densité de semences de chaque espèce dans le sol et de leur répartition verticale au sein de l'horizon travaillé (de 0 à 30 cm de profondeur).
- les éléments des systèmes de culture : travail du sol, caractéristiques d'implantation de la culture (variété, densité), opérations de lutte contre les adventices, fertilisation et date de récolte.
- l'environnement pédo-climatique : température, pluviométrie et ETP quotidiennes, ainsi que la texture et les conditions hydro-thermiques du sol.

En sortie, le modèle calcule tous les jours la densité d'individus de chaque espèce à chaque stade de croissance (plantule, stade végétatif, floraison, etc.) (Figure 4) ainsi que le stock semencier viable dans le sol. À terme, ce modèle plurispécifique couplé avec d'autres modèles pourra aussi prédire d'autres éléments, comme par exemple le rendement des cultures. FlorSys est constitué de deux modules principaux :

- un module de 'germination-levée' rendant compte de tous les processus affectant le stock semencier : mouvements de semences sous l'effet du travail du sol, induction-levée de dormances, imbibition, germination, élongation souterraine de la plantule ;
- un module de 'croissance-compétition-production semencière' rendant compte des processus de compétition pour la lumière déterminant les différences de production de biomasse et de nombre de semences entre les espèces et les individus.

La simulation des effets des systèmes de culture sur un grand nombre d'espèces adventices nécessite de connaître les valeurs des paramètres pour chacune d'entre elles. Dans sa version finale, FlorSys ira chercher les paramètres associés aux espèces dans la base de données BADOMA regroupant l'information disponible pour toutes les espèces adventices.



**Figure 4** : Exemples de sorties de FlorSys : évolution de la densité calculée de vulpin, pâturin annuel et renouée persicaire au cours de deux rotations (A : colza-blé-blé ; B : colza-blé-pois-blé). Courbe bleue : densité des plantes levées ; courbe rouge : densité des plantes fructifiant

## ...et identifier les questions posées par les systèmes de culture actuels ou à venir...

L'exploration de nouveaux champs d'action s'appuie sur l'expertise de l'ensemble des partenaires du RMT. L'objectif étant d'identifier des questions émanant des acteurs de la profession et/ou de la société civile relevant de la gestion de la flore adventice en grandes cultures et d'ébaucher des pistes de réponse envisageables compte tenu des connaissances disponibles pour en déduire d'éventuels nouveaux chantiers à mettre en œuvre dans la cadre des appels d'offres de CASDAR, de l'ANR ou tout autre appel à projets. Dans ce cadre d'action, il est prévu d'organiser des séminaires de travail (1 jour) sur des thèmes jugés prioritaires par l'ensemble des partenaires du RMT. Quelques exemples ont déjà été retenus :

- Optimisation du désherbage sur la rotation dans les systèmes de culture actuels
- Techniques de désherbage alternatives aux herbicides
- Techniques de désherbage en grandes cultures biologiques et transfert des connaissances vers l'agriculture conventionnelle
- Réduction du travail du sol et gestion de la flore adventice
- Etude et gestion des résistances aux herbicides
- Quels types de réduction d'herbicides ?
- Cultures sous couvert
- Innovation de systèmes de culture

A l'issue de chaque séminaire, les participants décideront si le thème doit faire l'objet de recherches supplémentaires de la part du groupe ou si nous disposons d'éléments suffisants pour diffuser de l'information, l'un n'excluant pas l'autre. Dans le premier cas, les partenaires hiérarchisent les priorités et construisent un ou plusieurs dossiers d'appel à projets ; dans le second cas, l'information est recensée et diffusée selon des outils de diffusion des connaissances spécifiques développés par le RMT (site web, plaquettes, modules de formation...)

La première de ces journées s'est déroulée sur le thème du plan Ecophyto 2018, l'objectif étant d'évaluer *a priori* les marges de manœuvres dont disposent les agriculteurs et d'évoquer les possibilités de relations avec le RMT Système de Cultures Innovants (SCI). La méthodologie développée par le RMT SCI semble appropriée à l'évaluation des hypothèses émises dans le RMT flore adventice : il s'agit de décrire un système de culture représentatif d'une région de production, de se focaliser sur un enjeu (dans notre cas, la réduction de 50% des herbicides) puis de faire une évaluation multicritères des différents niveaux de rupture (par exemple : zéro herbicides, désherbage mixte, techniques culturales simplifiées...). L'analyse multicritères permet de comparer *a priori* (sur des variables simples) les conséquences techniques, économiques, sociales et environnementales des différents niveaux de ruptures imaginés. Les connexions entre le RMT flore adventice et le RMT SCI sont en train de se mettre en place et pourraient se concrétiser au printemps prochain par le dépôt d'un projet commun de recherche à l'appel d'offres du CASDAR.

## Partager et faire partager notre connaissance

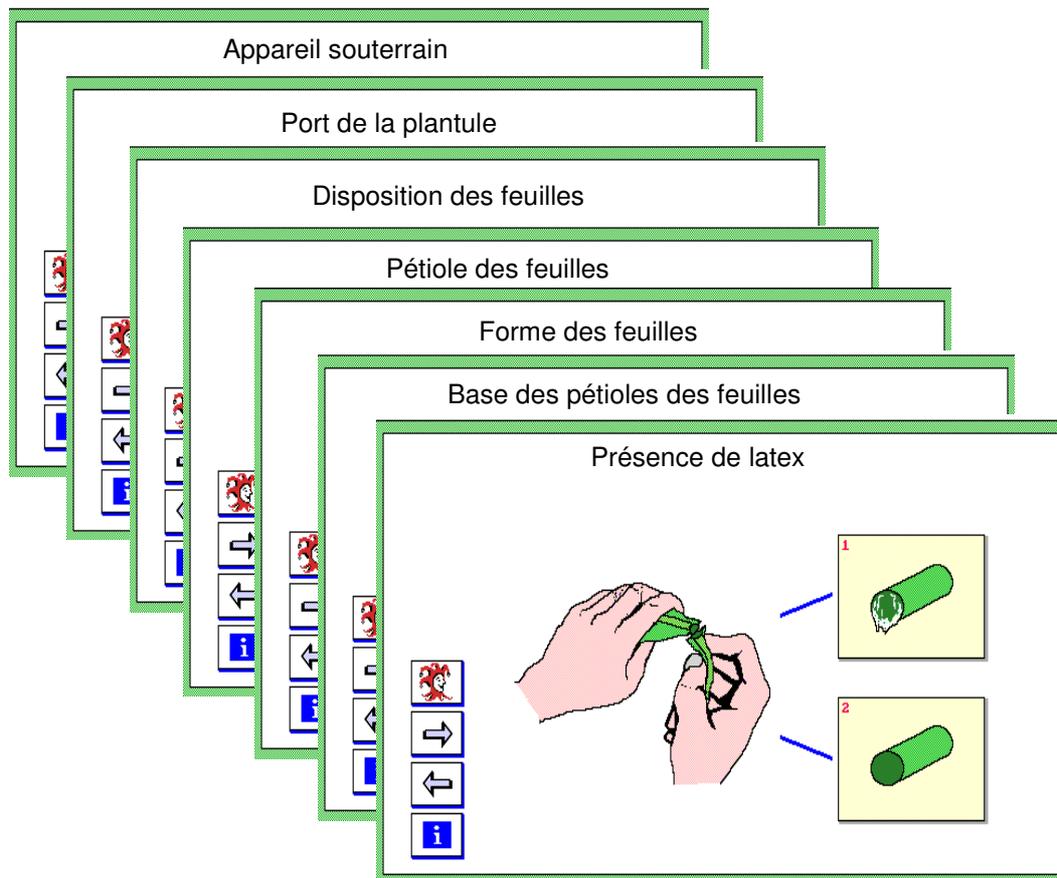
Une mission originale du RMT est de diffuser et d'échanger le plus largement possible avec l'ensemble de la profession agricole. Nous avons choisi deux moyens. Le premier est la construction d'un site web « RMT gestion de la flore » qui sera le support principal ainsi qu'une vitrine de nos activités et une source d'informations accessible à tous. Chacun doit pouvoir y trouver les informations collectées dans le cadre du travail commun (bibliographie, résultats d'expérimentations, compte rendu des journées de séminaires...) mais aussi contribuer à son enrichissement par le biais d'un forum de discussion. Le second moyen de diffusion des connaissances est la mise de l'accent sur la formation avec une

intervention à tous les niveaux de l'enseignement agricole et de la profession. L'ensemble des publics est visé : les agriculteurs par la formation continue, les conseillers et distributeurs, les jeunes en formation initiale ou qualifiante, les enseignants.

Quatre voies vont être explorées : les stages courts pour un public d'agriculteurs (type VIVEA), les stages instituts et chambres pour les conseillers et distributeurs (renforcement des interventions actuelles de plusieurs partenaires), un package pédagogique pour les étudiants (type MIL) et enfin la construction de modules de formation ouverte à distance (pour tous les niveaux).

C'est sur ce dernier point, à créer de toutes pièces (en plusieurs années qui dépasseront peut être la durée d'un RMT), que se porte actuellement l'essentiel de nos efforts en matière de formation. En effet, la pénurie actuelle d'offre d'enseignement sur les adventices et leur gestion est de plus en plus sensible. De plus, les demandes nouvelles de la société vis-à-vis des agriculteurs exigent de tous les publics et des enseignants en particulier d'appréhender et d'acquérir des connaissances nouvelles. L'objectif est donc de construire des modules de formation à distance qui permettront aux participants de tout niveau d'acquérir à leur rythme les bases de la connaissance de la flore adventice et de sa dynamique et les principes de gestion aussi bien fondés sur les herbicides que l'agronomie. Au-delà de la mise en forme des connaissances existantes dans les différentes disciplines, ces modules intégreront bien sûr les acquis spécifiques du groupe sur les modèles développés par les partenaires. Ils seront disponibles sur le site web spécifiquement développé par le RMT.

La première étape engagée consistera (en plusieurs années) à réaliser une maquette sur deux points précis (reconnaissance des espèces (Mamarot, 1997) (Malherb, Figure 5) et résistances aux herbicides) à partir du matériel produit par certains membres du groupe dans le cadre d'interventions ponctuelles dans des formations existantes. Une fois les problèmes informatiques, d'ergonomie et de pédagogie résolus, l'ambition est de réaliser un ensemble cohérent abordant tous les aspects de la connaissance sollicités par la malherbologie : botanique, agronomie, physiologie et mode d'action des herbicides, écologie, génétique.... Pour que tous les publics visés puissent en fonction de leur niveau progresser dans l'acquisition de connaissances, cet ensemble sera constitué de modules emboîtés du plus simple au plus complet. A ce corpus de connaissances bibliographiques générales mais aussi propres aux différents membres en fonction de leurs compétences, s'ajouteront des modules expérimentaux de diffusion (après validation par le groupe et des volontaires de la profession) des modèles développés par le groupe, ainsi que les résultats acquis dans le cadre de projets financés issus de questions de la profession. Ce travail de longue haleine nous semble un pré requis nécessaire pour accompagner les évolutions exigées de l'agriculture.



**Figure 5** : Malherb : clé des plantules : ensemble des caractères à observer sur une plantule de dicotylédone pour la situer dans un groupe d'espèces qui seront ensuite individualisées par des caractères spécifiques du groupe.

## Conclusion

Nous sommes aujourd'hui à l'aube d'une période de fortes évolutions dans beaucoup de domaines et en particulier en agriculture. La société souhaite consommer sain au meilleur prix et protéger son environnement. Cependant, toutes ces exigences de consommateur sont souvent contradictoires dans leur application agricole. Les prix doivent être maintenus au plus bas alors que le coût de l'énergie ne cesse d'augmenter. La réduction du travail peut permettre d'aller dans ce sens, mais elle exige une meilleure protection chimique. La réduction de l'usage des herbicides et engrais limitera les rendements mais les agriculteurs doivent produire suffisamment pour maintenir leur revenu. Les agriculteurs devront aussi gérer la biodiversité, mais viser un contrôle réduit des adventices entraîne perte de rendement, salissement de la récolte, augmentation du stock de semences pour des années. De plus, les espèces qui prendront le dessus ne seront pas forcément celles qui seraient souhaitées et elles hébergeront d'abord des ravageurs fongiques ou animaux plutôt que les auxiliaires attendus. Ces attentes divergentes ne pourront être prises en compte et évaluées que par le biais de modèles de plus en plus complexes. Cependant, les différents éléments des systèmes de production sont tellement en interaction que des variations minimales dans la réglementation, le coût de l'énergie ou le prix de la production pourront avoir beaucoup plus d'effet que d'importantes modifications de stratégies issues des simulations de modèles et longuement validées mais difficiles à faire accepter par les agriculteurs. Il nous faut donc, à la fois, développer des outils pour répondre à ces demandes, permettre aux acteurs

de se les approprier en les formant à des disciplines nouvelles pour eux. Mais, il faut aussi répondre aux questions des agriculteurs qui veulent qu'on résolve d'abord leurs problèmes actuels.

La constitution du « Réseau Mixte Technologique Gestion de la Flore Adventice en Grandes Cultures » est avant tout une suite logique dans la démarche de rapprochement d'un groupe pré-existant d'acteurs de la recherche, du développement et de l'enseignement agricole. Clairement identifié, aisément et rapidement mobilisable par la profession sur des questions d'actualités, c'est un outil d'accompagnement, d'expertise, de recherche, de conseil et de formation au service des producteurs, des prescripteurs et plus généralement de la société civile et du législateur. Outre la mise à disposition des acquis de la recherche, un tel groupe doit pouvoir répondre aux questions de la profession soit par la fourniture de connaissances soit par la réalisation de projets ciblés sur une question précise. Par ailleurs, les contraintes nouvelles imposées aux agriculteurs exigent de fournir à toute la chaîne depuis les enseignants jusqu'aux étudiants de tous niveaux et aussi à tous les acteurs de la profession des connaissances nouvelles dans leur discipline mais aussi d'autres disciplines dont ils ont désormais besoin.

Mais la vision d'un groupe de spécialistes, aussi compétents soient-ils dans leur domaine, est rarement suffisante pour évaluer la globalité des enjeux et apporter une réponse pertinente générale aux mutations profondes des modes de production agricole. Prenons l'exemple du plan Ecophyto 2018 ; il nous paraît indispensable d'intégrer à notre réflexion les avancées du RMT Systèmes de Cultures Innovants pour tester nos hypothèses. On pourrait aussi imaginer d'établir des liens avec d'autres RMT tels que « Biodiversité Fonctionnelle », « Modélisation », « Développement de l'Agriculture Biologique ». C'est là qu'apparaît tout l'intérêt de la structuration en réseau puisqu'elle permet d'établir rapidement et facilement des connexions entre différents groupes de spécialistes.

### Références bibliographiques

agriculture.gouv.fr : <http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/phyto-2018-plan-pour>

Journal Officiel - Décret n°2006-1154 du 15 septembre 2006 portant application de l'article 91 de la loi n°2006-11 du 5 janvier 2006 d'orientation agricole

Gasquez J, Fried G., Délos M., Gauvrit C., Reboud X. 2008. Vers un usage raisonné des herbicides : analyse des pratiques en blé d'hiver de 2004 à 2006. *Innovations Agronomiques* 3, 145-156.

Julien S., 2000. Evaluation et optimisation des stratégies de désherbage en agriculture biologique. Mémoire d'ingénieur, ENSAT -ACTA

Mamarot J., 1997. Mauvaises herbes des cultures. Editions ACTA. Paris

Munier-Jolain N., Kubiak P., Maillet-Mazeray J., Quéré L., Rodriguez A., Brochard M., Muchembled C., Verdier J.L., 2006. DECID'HERB : un logiciel d'aide au choix d'une méthode de lutte contre les mauvaises herbes pour une agriculture respectueuse de l'environnement. AFPP Conférence internationale sur les moyens alternatifs de protection des cultures. Lille 13-15 mars 2006. 9 pages

Paulhe A., 1997. Les méthodes complémentaires ou alternatives au désherbage chimique en grandes cultures. Mémoire d'ingénieur, INA PG -ACTA.

Rodriguez A., 2004. Connaître les adventices pour mieux les maîtriser. Grandes cultures en production biologique – Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées.

Rodriguez A., 2004. Le contrôle de la flore adventice en grandes cultures biologiques. *Alteragri* n°68 et 69.

Ruegg W.T., Quadranti M., Zoschke A., 2007. Herbicide research and development: challenges and opportunities. *Weed Research* 47, 271–275.

## **Evaluer les risques environnementaux des pesticides** Exemple du désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate

L. Mamy<sup>1,2</sup>, E. Barriuso<sup>1</sup>, B. Gabrielle<sup>1</sup>

(1) INRA-AgroParisTech, UMR 1091 Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval-Grignon

(2) INRA UR 251 PESSAC, Route de Saint Cyr, 78026 Versailles Cedex (Adresse actuelle)

Correspondance : laure.mamy@versailles.inra.fr

**Mots clés** : Sol, mobilité, persistance, indices, indicateurs, modèles numériques

### **Résumé**

L'évaluation des risques des pesticides est une étape clé dans la prévention de la contamination de l'environnement. En effet, l'utilisation des pesticides engendre des risques de contaminations chimiques de l'air, de l'eau et du sol qui peuvent avoir des conséquences toxicologiques (pour l'homme) et écotoxicologiques (pour les organismes vivants autres que l'homme). L'objectif de ce travail est de présenter différentes démarches d'évaluation des risques environnementaux liés à l'utilisation des pesticides, en les illustrant avec des exemples de méthodes couramment utilisées : méthodes simples (comparaison du nombre de pesticides ou des doses appliquées, mobilité et persistance des pesticides), méthodes qualitatives (indice GUS, indicateur I-Phy) et méthodes quantitatives (modèles numériques : PRZM, USES). A titre d'application, ces méthodes ont été comparées dans le cadre de l'évaluation des stratégies de désherbage des cultures génétiquement modifiées résistantes (GT) ou non à un herbicide à large spectre d'action, le glyphosate. Les méthodes simples reposent uniquement sur les techniques et ne tiennent pas compte de l'environnement physique alors qu'à l'autre extrême, les méthodes basées sur les flux (modèles, mesures) intègrent *de facto* les conditions agro-pédo-climatiques. Au milieu, certains indicateurs constituent une solution intermédiaire puisqu'ils intègrent dans leur calcul quelques variables de l'environnement. Les mesures *in situ* sont les plus précises, mais elles sont coûteuses et il est difficile de les multiplier. L'application au cas des cultures GT a montré que la comparaison des doses ou des quantités d'herbicides utilisés est très favorable à ces cultures, mais que plus les méthodes d'évaluation utilisées sont précises, moins les cultures GT semblent présenter d'avantages déterminants par rapport aux cultures conventionnelles.

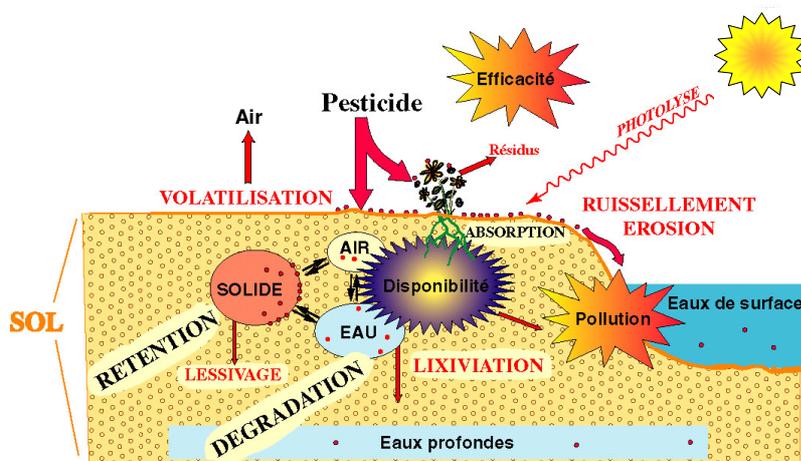
### **Abstract**

Risk assessment of pesticides is a key step to prevent environmental contamination. Indeed, the use of pesticides involves risks of chemical contaminations of air, water and soil leading to pollutions having toxicological (for human) and ecotoxicological (for organisms other than humans) consequences. The aim of this work was to present different methods of risk assessment of pesticides: simple methods (comparison of the number of pesticides used or of applied doses, mobility and persistence of pesticides), qualitative methods (GUS index, I-Phy indicator) and quantitative methods (numerical models: PRZM, USES). These methods have been compared during the assessment of weeding programmes of glyphosate tolerant (GT) and non-tolerant crops. Simple methods are only based on techniques and do not take into account physical characteristics of environment though the most complex methods based on fluxes (models, measures) fully take into account agro-pedo-climatic conditions. Indicators represent an intermediate solution as they consider some of the characteristics of the environment. Experimental measures are very acute but costly and they are difficult to replicate. Regarding the GT crops case study, if comparison of doses or number of pesticides applied is in favour

of these crops, the use of more acute assessment methods showed that GT crops did not offer many advantages compared to non-GT crops.

## Introduction

L'évaluation des risques liés aux pesticides est une étape clé dans la prévention de la contamination de l'environnement. En effet, l'utilisation des pesticides engendre un certain nombre de risques à l'égard de la composition chimique de l'air, de l'eau et du sol qui se traduisent par des pollutions dont les conséquences toxicologiques (pour l'homme) et écotoxicologiques (pour les organismes vivants autres que l'homme) peuvent être préjudiciables à la qualité de l'environnement (Figure 1) (Calvet *et al.*, 2005).



**Figure 1 :** Processus impliqués dans le devenir des pesticides dans les sols conditionnant leur disponibilité et, par conséquent, leur efficacité phytosanitaire ou la manifestation de leur caractère polluant (Barriuso *et al.*, 1996).

Un risque est la probabilité d'occurrence d'un effet nocif résultant de l'exposition d'une entité (homme, population, écosystème) à un danger qui peut être un agent chimique (pesticide), physique ou une action quelconque (Calvet *et al.*, 2005).

De façon générale, l'évaluation des risques repose sur une évaluation des impacts qui résultent du croisement de l'exposition et des effets vis-à-vis de la cible considérée. L'exposition peut être assimilée à la présence du pesticide pendant un temps donné dans un compartiment donné (eau, sol, air), l'effet se rapporte à l'action toxique du pesticide sur l'organisme vivant (Barriuso, 2004). Par exemple, la présence dans l'eau d'un pesticide à des concentrations au-delà d'un seuil d'acceptabilité (0,1 µg/L pour le seuil réglementaire de potabilité de l'eau) ou la toxicité sur des populations ou sur des individus peuvent constituer des descripteurs d'impacts. Cela se traduit par la définition de concentrations admissibles ou de niveaux d'exposition acceptables avec la proposition de paramètres d'évaluation du risque comme la dose journalière admissible (DJA), la concentration écologiquement admissible (ou acceptable) ou la concentration environnementale sans effet (PNEC). Ces paramètres de toxicité sont comparés aux concentrations environnementales prévisibles (PEC) pour définir des rapports toxicité/exposition ( $TER = PEC / PNEC$ ) qui sont utilisés pour l'évaluation des risques.

Au niveau réglementaire (en France et en Europe), il est obligatoire d'évaluer les risques des pesticides pour l'applicateur, le consommateur et l'environnement (Directive 91/414 CEE). L'autorisation de mise sur le marché pour toute préparation contenant des pesticides ne sera délivrée que si les risques sont acceptables (l'acceptabilité étant définie par rapport à des seuils admissibles préalablement déterminés, pour un usage donné). Afin de réaliser l'évaluation, un dossier comprenant des études répondant aux

exigences fixées par la Directive doit donc être constitué pour chaque matière active (m.a.) et chaque préparation commerciale. Dans la partie du dossier d'homologation correspondant à l'analyse des risques vis-à-vis de l'environnement, la description détaillée du comportement de la m.a. dans le sol, l'eau et l'air (Figure 1) est réalisée, ainsi que des calculs de PEC permettant de quantifier la présence de la m.a. et de ses métabolites dans ces compartiments (Gaillardon, 2004).

L'objectif de ce travail est de présenter différentes démarches d'évaluation des risques environnementaux des pesticides en comparant plusieurs méthodes de complexité différente. La comparaison sera illustrée par l'exemple de l'évaluation des stratégies de désherbage de cultures (colza, betterave, maïs) résistantes (GT) ou non à un herbicide à large spectre d'action, le glyphosate. En effet, l'introduction de ces cultures génétiquement modifiées est supposée diminuer le nombre et les doses d'herbicides utilisés donc réduire les risques de contamination de l'environnement. L'étude s'est appuyée sur des sites expérimentaux mis en place en 1995 à l'initiative des instituts techniques (CETIOM, ITB, Arvalis) et installés dans trois régions de production (Champagne : sol calcaire ; Bourgogne : sol argileux ; et Midi-Pyrénées : sol limoneux). Les successions de cultures ont été choisies de façon à refléter la réalité agricole. Les risques liés au glyphosate seront comparés aux risques liés aux herbicides classiquement utilisés dans les trois cultures : trifluraline et métazachlore pour le colza, métamitron pour la betterave, et sulcotrione pour le maïs. Ces herbicides ont été choisis en fonction de la fréquence de leur utilisation et de leurs caractéristiques physico-chimiques contrastées.

## 1. Généralités sur les méthodes d'évaluation

Un des premiers objectifs des méthodes d'évaluation des risques des pesticides est d'apporter des éléments de réponse pour le choix des pesticides et des pratiques de traitements susceptibles d'avoir le moins d'impact sur l'environnement et sur les hommes. Ces méthodes peuvent fournir un simple classement des pesticides (risque faible, modéré...), une note par catégorie d'impact (air, eau), ou des concentrations en pesticides dans différents compartiments de l'environnement qui peuvent ensuite être pondérées et agrégées pour conduire à une estimation plus globale des impacts potentiels (Levitan, 1997).

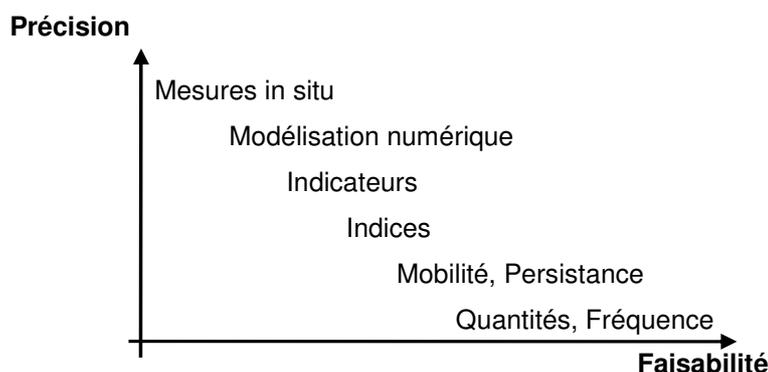
D'une manière générale, les méthodes d'évaluation sont basées sur les quatre étapes suivantes : (1) définition du système étudié et des options techniques à évaluer (ici parcelle et différentes stratégies de désherbage), (2) inventaires qualitatif et quantitatif des émissions de polluants induites par les techniques (dans notre cas, les polluants sont les herbicides), (3) agrégation par grandes catégories d'impacts (par exemple, potabilité des eaux), (4) comparaison des notes d'impact entre les différentes techniques évaluées pour identifier l'optimum agri-environnemental.

La Figure 2 classe différentes démarches et méthodes d'évaluation des risques des pesticides selon la faisabilité de mise en oeuvre et la précision des évaluations effectuées.

Les mesures *in situ* permettent d'évaluer précisément les risques mais elles sont coûteuses et contraignantes, elles sont affectées d'une grande variabilité en fonction des conditions agropédologiques et il est généralement difficile de les multiplier (Reus *et al.*, 2002 ; Calvet *et al.*, 2005).

Les méthodes d'évaluation les plus simples reposent uniquement sur les techniques ou sur les données liées à l'utilisation des pesticides. Elles consistent à comparer les doses appliquées, le nombre de matières actives utilisées ou la fréquence de traitement, mais ne donnent accès à aucune information précise sur la nature des impacts potentiels (Levitan, 1997) et ne tiennent pas compte de

l'environnement bio-physique. Récemment, en France, le Plan ECOPHYTO 2018 (2008) a mis en avant deux indicateurs destinés à évaluer et montrer l'effectivité des efforts dans la diminution de l'usage des pesticides en agriculture : (1) l'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) est un indicateur de la pression exercée sur le milieu basé sur les pratiques agricoles par type de culture et (2) le Nombre de Doses Unitaires (NODU), calculé comme la somme des quantités totales de m.a. vendues, chacune rapportée à la dose unitaire homologuée spécifique de la m.a. Le NODU a été retenu comme indicateur de référence pour suivre annuellement l'usage des pesticides sur l'ensemble des surfaces agricoles utilisées.



**Figure 2 :** Précision de différentes méthodes d'évaluation des risques environnementaux des pesticides en fonction de leur faisabilité.

D'autres méthodes reposent sur l'évaluation de la mobilité (caractérisée par la rétention dans les sols) ou de la persistance (caractérisée par la dégradabilité dans les sols) des m.a., indiquant un impact potentiel sur le sol (molécules persistantes) ou sur l'eau (molécules mobiles). La combinaison (agrégation) des paramètres permettant de décrire ces deux processus a conduit à l'élaboration d'indices empiriques d'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines (Gustafson, 1989 ; Worrall *et al.*, 2000). Ces méthodes relativement simples ne prennent en compte que les propriétés des m.a. et demeurent peu précises sur la nature des impacts.

Certains indicateurs permettent d'accéder à un niveau de précision supérieur. Ils requièrent plus de données en entrée (toxicité, caractéristiques du milieu, conditions d'application) et conduisent à une évaluation plus précise des impacts sur l'eau, l'air, le consommateur ou l'agriculteur (Hornsby, 1992 ; Levitan *et al.*, 1995 ; Bockstaller *et al.*, 1997 ; Van der Werf et Zimmer, 1998 ; Benbrook *et al.*, 2002 ; Reus *et al.*, 2002). Ils peuvent intégrer en plus des aspects économiques (Levitan *et al.*, 1995 ; Van der Werf, 1996). Les impacts sont évalués séparément (Levitan *et al.*, 1995) ou sont agrégés pour fournir une note globale d'évaluation (Bockstaller *et al.*, 1997 ; Levitan, 1997 ; Van der Werf et Zimmer, 1998). Le mode de calcul repose généralement sur des arbres de décision comme par exemple l'approche du CORPEN (Real, 2004) ou celle de l'indicateur de produits phytosanitaires I-Phy (Bockstaller, 2004). I-Phy prend en compte l'incertitude sur les données d'entrée ce qui constitue un point important pour l'utilisation de cet indicateur.

L'évaluation quantitative des impacts potentiels des pesticides peut être réalisée grâce à l'utilisation de modèles numériques de simulation qui permettent d'obtenir des flux et des concentrations en pesticides dans différents compartiments de l'environnement (air, sol, eau, plante). Il existe de nombreux modèles numériques simulant le devenir et le transport des pesticides dans le sol (Boesten et Van der Linden, 1991 ; Jarvis, 1994 ; Carsel *et al.*, 1998). Ils décrivent la dégradation et la rétention des pesticides, la volatilisation, le ruissellement, l'érosion, le prélèvement des pesticides par les plantes, en fonction des caractéristiques pédo-climatiques et des modes d'apport des produits phytosanitaires. La comparaison des concentrations obtenues dans un compartiment à des seuils fournit une estimation de l'impact potentiel sur ce compartiment. Cependant, elle ne permet pas de déterminer l'impact sur les autres

compartiments, ni de déterminer le niveau de l'impact de cette concentration sur le compartiment lui-même.

Les méthodes d'estimation des impacts environnementaux utilisées dans le cadre d'analyse de cycle de vie (ACV) des produits permettent d'accéder à cette évaluation. Les émissions de pesticides (c'est-à-dire leurs concentrations dans différents compartiments de l'environnement) sont agrégées par type d'impact au moyen de potentiels de toxicité pour accéder au niveau de l'impact sur un compartiment (USEPA, 2001). Il existe plusieurs méthodes de détermination des potentiels de toxicité (Huijbregts *et al.*, 2000 ; Margni *et al.*, 2002 ; Brenttrup *et al.*, 2003) ; les calculs diffèrent par les paramètres pris en compte, les compartiments d'émission et les compartiments cibles étudiés. Toutes ces méthodes ne sont cependant pas appliquées aux pesticides.

## 2. Approches simples

### 2.1 Doses, quantités, fréquence de traitement

La comparaison du nombre d'herbicides et des doses apportées permet d'estimer le nombre de polluants potentiels. Plus le nombre de molécules apportées est important, plus le nombre de polluants potentiels de l'environnement sera important. De même, plus les doses seront importantes, plus les risques de contamination de l'environnement seront importants.

La fréquence de traitement est caractérisée par l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) qui correspond au nombre de doses homologuées de pesticides appliquées sur une parcelle pendant une campagne culturale. Il reflète l'intensité d'utilisation des pesticides (Pingault, 2007). Pour chaque culture et pour différentes zones géographiques, un IFT maximal de référence a été défini. Le terme d'« indicateur » est utilisé ici, mais il est en général attribué à des méthodes plus complexes qui tiennent compte des caractéristiques de l'environnement et des molécules (Figure 2, Cf 3.2).

Le Tableau 1 présente les principales matières actives utilisées dans les programmes de désherbage liés aux cultures GT et non-GT ainsi que les IFT correspondants.

Les résultats montrent que l'introduction de cultures GT devrait permettre de réduire le nombre de m.a. appliquées (une seule dans le cas du glyphosate, au minimum 2 dans le cas de cultures conventionnelles) et les quantités, donc, *a priori*, de réduire les risques de contamination de l'environnement. De même, les IFT sont plus faibles dans le cas des cultures GT. Cependant, le nombre de pesticides appliqués ne tient pas compte de la dose : ainsi, un seul passage à haute dose paraîtra moins défavorable que deux passages à faible dose. D'autre part, si des substances appliquées à haute dose sont remplacées par des substances très efficaces à faible dose, la pression exercée sur le milieu et les risques ne diminuent pas (Pingault, 2007).

L'IFT fournit une première approche de l'intensité du recours aux pesticides intégrant dans son calcul la dose d'utilisation, mais le profil environnemental de la spécialité n'est pas pris en compte (comportement des m.a. dans l'environnement, écotoxicité) (Aubertot *et al.*, 2005). Ceci est également vrai lorsque l'on compare le nombre de pesticides ou les doses appliquées.

**Tableau 1** : Programmes de désherbage des cultures de colza, betterave et maïs conventionnelles et résistantes au glyphosate (Mamy *et al.*, 2005) et IFT par programme

Culture Sol	Colza			Betterave			Maïs		
	Herbicide	Dose (kg/ha)	IFT	Herbicide	Dose (kg/ha)	IFT	Herbicide	Dose (kg/ha)	IFT
Désherbage conventionnel : cultures non résistantes									
Calcaire	Dimétachlore	1.12	4.8	Métamitron	1.54	5.1	-	-	-
	Napropamide	1.12		Phenmédiophame	0.63				
	Clomazone	0.18		Ethofumésate	0.58				
Argileux	Trifluraline	1.20	2.7	Clopyralide	1.91	17.6	Alachlore	2.40	3.0
	Métazachlore	0.72		Métamitron	1.40		Atrazine	1.00	
	Quinmérac	0.18		Phenmédiophame	0.41		Pyridate	0.90	
Limoneux	Trifluraline	1.20	1.9	- <sup>a</sup>	-	-	Alachlore	2.40	3.0
	Napropamide	0.67		Atrazine	1.00		Pyridate	0.90	
Désherbage au glyphosate : cultures résistantes									
Calcaire Argileux Limoneux	Glyphosate	1.44	1.4	Glyphosate	3.06	3.1	Glyphosate	2.88	2.9

<sup>a</sup> Non cultivée sur ce site

## 2.2 Mobilité

Dans le sol, la mobilité des pesticides dépend des phénomènes de rétention qui conditionnent la disponibilité des pesticides, assimilée à leur capacité à se trouver dans une phase fluide (en particulier la solution du sol), à être mobilisés dans le sol, mais aussi à être dégradés par la microflore ou absorbés par les plantes. L'étude de la mobilité est donc fondamentale dans l'évaluation des risques environnementaux des pesticides.

La rétention est essentiellement due aux phénomènes physico-chimiques d'adsorption (accumulation des pesticides à l'interface solide-liquide) et de désorption (phénomène inverse conduisant au passage en solution des pesticides) (Calvet *et al.*, 2005). La rétention est caractérisée au laboratoire avec des méthodes standardisées simplifiées permettant l'obtention d'isothermes d'adsorption et de désorption qui sont des représentations graphiques des données d'équilibre des concentrations du pesticide en solution et adsorbé sur le sol. Expérimentalement, on réalise une suspension de sol dans une solution aqueuse de pesticide pendant une durée de quelques heures à quelques jours (Barriuso, 2004). Au bout d'un certain temps (en général 24 heures), la quantité de pesticides restant en solution est dosée et par différence, on en déduit la quantité adsorbée.

Lorsque les isothermes d'adsorption sont proches de la linéarité, on calcule un coefficient de partage ou de distribution,  $K_d$  (en L/kg), qui est le ratio entre la quantité de pesticide adsorbée sur le sol et la concentration en pesticide en solution à l'équilibre. Ce coefficient est souvent rapporté à la teneur en carbone organique des sols pour en déduire un  $K_{oc}$ . Dans le cas des isothermes non linéaires, d'autres équations mathématiques empiriques sont utilisées, notamment le formalisme de Freundlich.

Plus la valeur du  $K_d$  (ou du  $K_{oc}$ ) est grande, plus l'adsorption du pesticide est importante, plus sa mobilité est faible et moins les risques de contamination des eaux souterraines seront élevés. Cependant, les pesticides fortement retenus sont susceptibles d'être mobilisés par transport particulière lors d'épisodes de ruissellement ou d'érosion, ou en présence d'écoulements préférentiels dans les profils des sols.

Les coefficients d'adsorption varient considérablement d'un pesticide à l'autre et d'un sol à l'autre comme le montrent les exemples présentés dans le Tableau 2.

**Tableau 2 :** Coefficients d'adsorption Koc (L/kg) des herbicides utilisés dans les cultures GT et non-GT (Mamy et Barriuso, 2005) et pourcentages désorbés (en % de la quantité adsorbée) (Mamy et Barriuso, 2007)

Sol Herbicide	Calcaire		Argileux		Limoneux	
	Koc (L/kg)	% Désorbé	Koc (L/kg)	% Désorbé	Koc (L/kg)	% Désorbé
Glyphosate	1552	28.1	2375	28.3	44630	7.5
Trifluraline	2296	14.9	2335	21.9	3398	23.6
Métazachlore	67	71.3	66	64.8	103	61.8
Métamitronne	64	63.4	64	77.6	94	73.3
Sulcotrione	17	49.8	23	31.8	132	67.7

Dans ces exemples, le glyphosate est l'herbicide le plus fortement adsorbé sur les sols, suivi de la trifluraline, puis du métazachlore, de la métamitronne et de la sulcotrione. L'intensité de l'adsorption des pesticides dépend des caractéristiques des sols et des caractéristiques physico-chimiques de la m.a. Ainsi, celle du glyphosate dépend du pH du sol en relation avec son aptitude à être ionisé et à former des complexes avec les cations métalliques présents dans le sol. L'adsorption de la trifluraline est corrélée positivement au contenu des sols en carbone organique et est due à son hydrophobicité (faible solubilité dans l'eau). L'adsorption du métazachlore et celle de la métamitronne dépendent du contenu des sols en carbone organique et de la capacité d'échange cationique ; tandis que l'adsorption de la sulcotrione est surtout corrélée au pH (Mamy et Barriuso, 2005).

La désorption des herbicides est, d'une manière générale, inversement proportionnelle à l'adsorption : importante pour les herbicides faiblement adsorbés (métazachlore, métamitronne, sulcotrione) et faible pour les herbicides fortement adsorbés (glyphosate, trifluraline) (Tableau 2). Néanmoins, dans les sols calcaires et argileux, la désorption du glyphosate est plus importante que celle de la trifluraline et dans le sol argileux, elle est comparable à celle de la sulcotrione, indiquant que le glyphosate peut présenter des risques de lixiviation dans les sols où son adsorption est plus modérée (Mamy et Barriuso, 2007).

En terme d'introduction de plantes GT et d'après les résultats concernant la mobilité des herbicides, l'utilisation de glyphosate comme moyen de réduire les risques de pollution ne doit pas être généralisée. Dans les sols où l'adsorption est plus modérée, le glyphosate peut être plus fortement désorbé et donc présenter des risques de dispersion plus importants que certains herbicides classiquement utilisés (trifluraline notamment). Néanmoins, par rapport à des herbicides dont l'adsorption est faible (métazachlore, métamitronne, sulcotrione), le glyphosate présente systématiquement moins de risques de mobilité.

### 2.3 Persistance

La persistance d'un pesticide dans le sol peut être considérée d'un point de vue analytique (durée pendant laquelle la molécule peut être dosée), agronomique (durée pendant laquelle la molécule produit l'effet souhaité, effet phytotoxique sur les mauvaises herbes par exemple) ou environnemental (durée pendant laquelle un pesticide a un effet non souhaité sur des organismes vivants) (Calvet *et al.*, 2005).

La prévision de la persistance des pesticides nécessite l'étude de leur dégradation, qui est l'un des processus clé du devenir des pesticides dans les sols puisqu'elle influence fortement leur dissipation et leur élimination des milieux naturels. La dégradation peut être de nature biotique (dégradation par la

microflore, la microfaune et les végétaux) ou abiotique (hydrolyse, photolyse). Toute une série de molécules intermédiaires (les produits de dégradation ou métabolites) entre la molécule initiale et les molécules minérales finales peuvent être produites (Calvet *et al.*, 2005). C'est lorsque le pesticide est transformé en molécule minérale, comme le CO<sub>2</sub>, qu'il est totalement éliminé. Ce phénomène est appelé minéralisation.

La caractérisation de la dégradation peut être réalisée au laboratoire ou au champ. Dans les deux cas, il s'agit d'obtenir des informations sur l'évolution des concentrations en pesticide dans un volume de sol donné. Au laboratoire, les expériences mises en place consistent à incuber des échantillons de sol sur lesquels sont appliqués des pesticides. Dans ces conditions, les données obtenues correspondent bien à la dégradation du pesticide, en absence d'autres phénomènes de dissipation pouvant se produire au champ (comme la lixiviation) (Barriuso, 2004). La persistance est évaluée en déterminant la durée de demi-vie de dégradation (DT50) qui correspond à la durée au bout de laquelle la moitié de la quantité initialement présente est dégradée.

Les DT50 des cinq herbicides et de leurs principaux métabolites sont présentées dans le Tableau 3.

**Tableau 3 :** Durées de demi-vie (jours) au laboratoire des herbicides et de leurs principaux métabolites dans trois sols (Mamy *et al.*, 2005)

Herbicide / Sol	Calcaire	Argileux	Limoneux
Glyphosate	<<1	0.8	3.7
AMPA*	25	34	75
Trifluraline	25.2	24.2	14.2
Métazachlore	1.9	2.7	3.5
M4**	218	309	326
Métamitronne	8.1	2.3	25.4
Sulcotrione	2.1	2.0	2.5
CMBA***	71	46	55

\* Acide aminométhylphosphonique

\*\* Métabolite non identifié

\*\*\* Acide 2-chloro-4-méthylsulfonylbenzoïque

Dans les conditions de laboratoire utilisées (28°C, humidité du sol à la capacité au champ), conditions optimales pour la dégradation des pesticides, la persistance des herbicides est très faible, en particulier pour le glyphosate, et, d'une manière générale, elle diminue dans le sens : trifluraline > métamitronne > métazachlore > sulcotrione > glyphosate. Cependant, dans le sol limoneux, où son adsorption est élevée, le glyphosate est plus persistant que le métazachlore et la sulcotrione. La formation d'un métabolite majeur a été observée dans les cas du glyphosate (acide aminométhylphosphonique, AMPA), du métazachlore (métabolite non identifié, M4) et de la sulcotrione (acide 2-chloro-4-méthylsulfonylbenzoïque, CMBA). Les DT50 des métabolites sont bien supérieures à celles des herbicides (20 à 100 fois plus élevées), en conséquence, ces métabolites présentent des risques pour l'environnement plus importants que les herbicides.

Ainsi, le desherbage exclusif ou intensif utilisant uniquement du glyphosate, dans le cas d'introduction des cultures GT, peut entraîner l'accumulation de son métabolite, l'AMPA. Mais ce problème d'accumulation de produits de dégradation des pesticides doit aussi être pris en compte pour les autres m.a., car, dans les exemples du Tableau 3, tous les métabolites étudiés ont des persistances plus importantes que les m.a., la DT50 de l'AMPA étant inférieure aux DT50 des métabolites du métazachlore et de la sulcotrione.

Les expérimentations réalisées au laboratoire ont permis d'approcher des grandeurs décrivant les cinétiques de dégradation. Néanmoins, ces résultats sont issus d'expériences en conditions contrôlées où la température et l'humidité des sols restent constantes. En conditions de plein champ, ces

paramètres fluctuent dans le temps avec des amplitudes variables ayant des répercussions sur la dynamique globale de la microflore du sol et celle particulière des microorganismes impliqués dans la dégradation des herbicides. L'acquisition de données de référence en conditions de plein champ est nécessaire pour confirmer la pertinence des grandeurs obtenues au laboratoire dans le cadre de la prévision du comportement des herbicides. En effet, pour les exemples présentés dans ce travail, la persistance des herbicides en plein champ est différente de celle qui a été observée au laboratoire : le glyphosate est plus persistant que le métazachlore, mais moins que la trifluraline, qui reste l'herbicide le plus persistant. Contrairement à ce que leurs coefficients de rétention laissaient supposer (Cf 2.2), la trifluraline et l'AMPA ont été détectés en profondeur, ce qui met en évidence une mobilité effective de ces composés dans le profil du sol, peut-être liée au transport particulaire, à l'inverse du glyphosate et du métazachlore (Mamy *et al.*, 2008).

D'une manière générale, plus un pesticide est retenu dans le sol, moins il est mobile et moins il présente de risque de contamination des nappes. Plus il sera persistant, plus il restera dans le sol avec de possibles problèmes d'accumulation et plus il aura d'occasions d'être soumis à des phénomènes de transfert entraînant une contamination des nappes (Barriuso, 2004). La combinaison des paramètres de rétention et de dégradation peut ainsi être utilisée pour évaluer les risques de contamination des eaux souterraines.

### 3. Indices et indicateurs

#### 3.1. Indice GUS

##### 3.1.1. Principe

L'indice empirique de lixiviation GUS (Groundwater Ubiquity Score) (Gustafson, 1989) permet de classer les pesticides par rapport à leur aptitude à être transférés vers les eaux souterraines. Il a été élaboré en confrontant des mesures de concentrations en pesticides dans les eaux, obtenues *in situ*, aux Koc et DT50 des molécules. C'est donc un indice qui n'a qu'une cible, les eaux souterraines, et qui nécessite la connaissance des DT50 et des Koc des pesticides. L'indice GUS est calculé de la façon suivante :

$$\text{GUS} = \log \text{DT50} [4 - \log (\text{Koc})]$$

En fonction de la valeur obtenue, les pesticides présentent un risque de contamination des nappes élevé (GUS > 2.8) ou un risque de contamination des nappes faible (GUS < 1.8).

##### 3.1.2. Résultats

La Figure 3 rassemble les valeurs des indices GUS pour les cinq herbicides et leurs principaux métabolites, calculés à partir des Koc et des DT50 obtenus au laboratoire (Tableaux 2 et 3).

Le glyphosate est l'herbicide pour lequel les indices GUS sont les plus faibles. Cependant, dans l'ensemble, les herbicides présentent peu de risques de lixiviation, sauf la métamitronne dans les sols calcaire et limoneux. Dans le cas des métabolites, les risques de lixiviation de l'AMPA sont faibles (GUS < 1.8), mais ils sont plus élevés que ceux du glyphosate. Pourtant, lors de l'étude du devenir du glyphosate en conditions de plein champ, nous avons observé une migration de l'AMPA dans le profil de sol, indice de la mobilité de ce métabolite (Mamy *et al.*, 2008). Il ne s'agit pas de la remise en cause de l'indice GUS comme indicateur de lixiviation, mais de l'illustration des limites de son utilisation. Pour le métazachlore et la sulcotrione, les risques de dispersion dans l'environnement concernent plus particulièrement leurs métabolites.

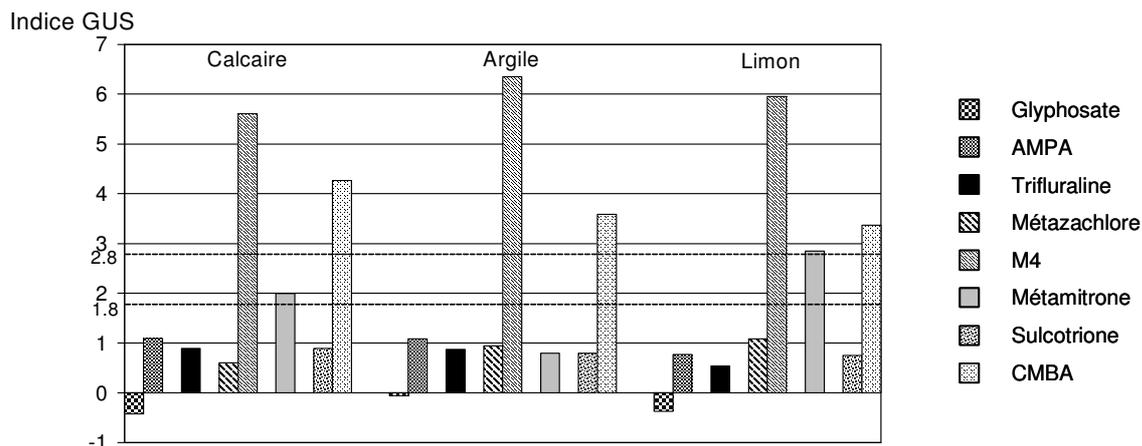


Figure 3 : Indices GUS des herbicides et de leurs métabolites dans trois sols (Mamy, 2004).

La comparaison du comportement des herbicides dans l'environnement à partir des indices GUS montre que le glyphosate présente les risques de contamination de l'eau les plus faibles. De ce point de vue, l'introduction de cultures GT pourrait donc constituer une réponse favorable aux problèmes de contamination de l'environnement par les herbicides. Cependant, cette approche fait une estimation à partir des propriétés intrinsèques des pesticides, elle fait l'impasse sur les conditions pédo-climatiques de leur utilisation et ne tient pas compte du transport des pesticides du point de vue des propriétés du milieu ou des phénomènes impliqués. L'indice GUS ne donne donc qu'une indication sur un potentiel de lixiviation. D'autre part, les valeurs de DT50 et Koc sont souvent assorties d'une incertitude importante qui accroît l'imprécision de cet indice.

### 3.2. Indicateur I-Phy

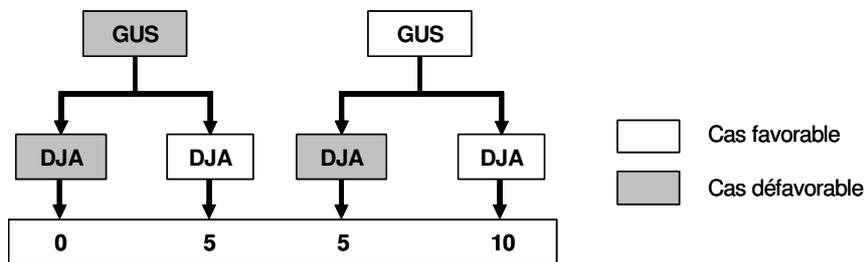
#### 3.2.1. Principe

L'indicateur I-Phy permet d'évaluer les impacts potentiels des produits phytosanitaires sur différents compartiments de l'environnement (Boskstaller, 2004). Il prend en compte certaines pratiques agricoles (mode d'application des herbicides, cultures...) et, contrairement à la majeure partie des indicateurs existants (Hornsby, 1992 ; Levitan *et al.*, 1995 ; Van der Werf, 1996), il conduit à une estimation des impacts sur l'air, l'eau de surface et les eaux souterraines. La construction de I-Phy repose sur l'hypothèse que l'impact d'un pesticide dans l'environnement dépend de la quantité de produit, de la dispersion hors de la parcelle par dérive, volatilisation, ruissellement ou lixiviation et de la toxicité du produit sur divers organismes cibles (Van der Werf et Zimmer, 1998). I-Phy est donc composé de quatre modules : « Dose », « Risques de contamination des eaux souterraines » (Reso), « Risques de contamination de l'eau de surface » (Resu), et « Risques de contamination de l'air » (Rair).

Dans le module « Dose », seule la quantité de pesticide apportée est prise en compte. Le module « Risque de contamination des eaux souterraines » permet de noter le risque à partir du potentiel de lixiviation du pesticide (estimé à l'aide de l'indice GUS défini précédemment), du mode d'application du pesticide (foliaire, surface du sol ou incorporation), du risque de lixiviation engendré par le type de sol (estimé à partir du taux de matière organique du sol, de la texture ou de la profondeur du sol) et de la toxicité pour l'homme estimée à partir de la dose journalière admissible (DJA). Le module « Risque de contamination de l'eau de surface » est paramétré en fonction du risque de ruissellement engendré par les caractéristiques de la parcelle (pente, longueur, texture, état de surface), du taux de dérive de l'application du produit (estimé à partir de la distance de la parcelle au cours d'eau), du mode

d'application, de la persistance du pesticide et de sa toxicité sur les organismes aquatiques (algues, crustacés, poissons). Le module « Risque de contamination de l'air » prend en compte la volatilité du pesticide (estimée à partir de la constante de Henry), le mode d'application, la persistance et la toxicité du pesticide pour l'homme (DJA).

Le mode de calcul de I-Phy est basé sur un système expert (selon des règles de décision) utilisant la logique floue. Pour chaque variable d'entrée, des règles de décision permettant de calculer l'indicateur sont définies et deux valeurs limites correspondant aux cas favorable et défavorable sont déterminées. Par exemple, une valeur de l'indice GUS égale à 1.8 est favorable, tandis qu'une valeur égale à 2.8 est défavorable ; de même une DJA égale à 1 mg/kg est favorable mais est défavorable lorsqu'elle est égale à 0.0001 mg/kg. Ensuite, l'indicateur est calculé pour ces valeurs limites, ce qui permet de construire des règles de décision. La Figure 4 donne un exemple simplifié de définition des règles de décision.



**Figure 4 :** Exemple de définition simplifiée de règles de décision pour le module eaux souterraines Reso (d'après Bockstaller, 2004).

Dans l'exemple de la Figure 4, si le GUS et la DJA sont favorables, la note obtenue est maximale (égale à 10). En revanche, s'ils sont défavorables, la note sera égale à 0. Les deux cas intermédiaires conduisent à une note égale à 5. Pour obtenir une notation continue, chaque variable (GUS et DJA pour reprendre l'exemple de la figure 4) est affectée d'une valeur d'appartenance à la classe favorable et à la classe défavorable. Les valeurs d'appartenance sont obtenues à partir de « fonctions d'appartenance » définies pour chaque variable. Le plus souvent, il s'agit de fonctions sinusoïdales. Si la valeur de l'indice GUS d'un pesticide est égale à 2.5, les fonctions d'appartenance correspondantes indiqueront, par exemple, que cette valeur appartient à 84 % au cas défavorable et à 16 % au cas favorable. Ensuite, pour chaque règle de décision (Figure 4), il faut définir une « valeur de vérité » qui correspond au minimum des valeurs des conditions d'une règle. Le Tableau 4 donne un exemple de la détermination de la valeur de vérité (des valeurs d'appartenance hypothétiques ont été attribuées à la DJA).

**Tableau 4 :** Exemple de détermination des valeurs de vérité pour le module de risque Reso

GUS Classe (Valeur) d'appartenance	DJA Classe (Valeur) d'appartenance	Note (Valeur de vérité)
f (0.16)	f (0.7)	10 (0.16)
f (0.16)	d (0.3)	5 (0.16)
d (0.84)	f (0.7)	5 (0.7)
d (0.84)	d (0.3)	0 (0.3)

f = favorable, d = défavorable

L'étape finale consiste au calcul de la valeur de I-Phy : la note pour une catégorie d'impact (eau de surface, eaux souterraines, air) est égale à la moyenne des conclusions des règles pondérée par les

valeurs de vérité (Van der Werf et Zimmer, 1998 ; Bockstaller, 2004). Ainsi, pour l'exemple de la Figure 4, la note d'impact sur les eaux souterraines (I Reso) est égale à :

$$I \text{ Reso} = \frac{10 \times 0.16 + 5 \times 0.16 + 5 \times 0.7 + 0 \times 0.3}{0.16 + 0.16 + 0.7 + 0.3}$$

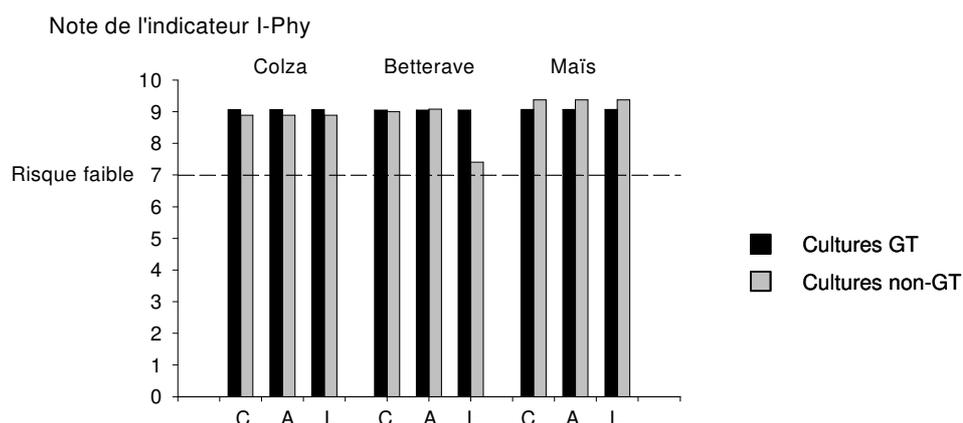
Pour chaque application de substances actives, une note globale est obtenue en combinant la dose et les notes des trois modules de risque en utilisant la même méthode de logique floue. Les trois risques et la dose sont affectés d'un poids égal, la dose aura donc un poids important dans la note finale.

Les données d'entrée de I-Phy se répartissent entre des données concernant les pesticides, le sol et les cultures. Une valeur de l'indicateur supérieure à 7 indique que le risque est faible et que le programme peut entrer dans l'agriculture raisonnée ou intégrée.

### 3.2.2. Résultats

Aussi bien pour les programmes de désherbage conventionnels que pour les programmes associés aux cultures GT, les notes obtenues sont supérieures à sept (Figure 4), ce qui indique un risque faible pour l'environnement (Bockstaller, 2004). Pour les cultures de colza GT et betterave GT, les valeurs de I-Phy du programme de désherbage sont un peu plus élevées que celles des programmes de désherbage classique. Dans le cas des cultures de maïs, l'inverse est observé, mais les différences restent peu importantes. La note obtenue par compartiment n'est pas détaillée ici, mais pour chacun des herbicides, les résultats montrent généralement un risque faible de contamination des eaux de surface ou souterraines et de l'air.

Les résultats sont en accord avec le calcul des indices GUS qui a montré que les herbicides présentent peu de risques de contamination des eaux souterraines. Ils sont du même ordre de grandeur que ceux de Girardin *et al.* (1998), indiquant qu'il n'y a pas d'avantage déterminant à utiliser des cultures résistantes au glyphosate, selon les critères utilisés.



**Figure 4 :** Valeurs de I-Phy pour les différents programmes de désherbage (C : Calcaire, A : Argileux, L : Limoneux) (Mamy, 2004).

I-Phy n'est cependant pas sensible à la nature du sol puisque, pour chaque programme, les notes sont identiques sauf exception (cas de la métamitronne dans le sol limoneux). D'autre part, il ne permet pas de prendre en compte les métabolites des herbicides qui sont les molécules susceptibles de poser des problèmes de contamination.

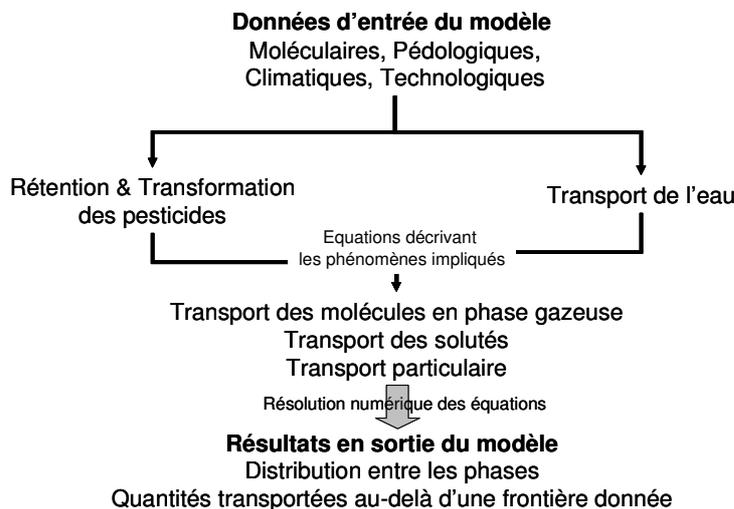
L'utilisation de ce type d'indicateur doit être bien circonscrit en relation avec les hypothèses et les objectifs utilisés pour son élaboration. En particulier, les facteurs de milieu ne sont pas explicitement pris en compte, ce qui sans doute est à l'origine d'une partie de l'incertitude sur les sorties. De plus, I-Phy ne permet pas de réaliser des évaluations à long terme puisqu'il ne considère qu'une saison culturale. L'utilisation de modèles numériques permet d'intégrer ces points.

#### 4. Modélisation numérique

##### 4.1 Principes généraux

La modélisation numérique est un outil fondamental pour la description des transferts de pesticides dans les différents compartiments de l'environnement et pour la prévention des risques de pollution (ECRIN, 2002). Elle permet de prendre en compte les conditions environnementales et hydrologiques, les propriétés chimiques et les pratiques agronomiques (Calvet, 1995). La plupart des modèles de simulation du devenir des pesticides sont structurés comme indiqué sur la Figure 5. Les modèles diffèrent par le nombre de phénomènes décrits et les approximations introduites.

La mise en œuvre de modèles numériques présente des difficultés relatives d'une part à l'incertitude sur les valeurs de certaines variables d'entrée (ou paramètres) et d'autre part aux performances des modèles. Ces derniers n'ont en effet qu'une capacité limitée à reproduire des situations observées et à prévoir de nouvelles situations (ECRIN, 2002). Ainsi, une démarche de modélisation rigoureuse comprend quatre étapes successives et distinctes : la paramétrisation du modèle, l'étude de sa sensibilité aux données d'entrée, le test du modèle pour estimer son erreur de prédiction et le cas échéant, le calage du modèle. Cette dernière étape, souvent nécessaire, consiste à ajuster les variables d'entrée de manière à obtenir une description satisfaisante des observations.



**Figure 5 :** Structure générale des modèles simulant le devenir des pesticides dans l'environnement (D'après ECRIN, 2002).

La paramétrisation du modèle, c'est-à-dire le choix des valeurs qui vont représenter le sol, les cultures et les pesticides, est très importante pour les prévisions du devenir des pesticides (Brown *et al.*, 1996 ; Trevisan *et al.*, 2000 ; Garratt *et al.*, 2002 ; ECRIN, 2002). Plus les données d'entrée seront connues avec précision et plus les incertitudes liées à la modélisation seront faibles (Dubus *et al.*, 2002).

L'influence des valeurs attribuées aux paramètres sur les résultats peut parfois être plus importante que l'influence liée au modèle lui-même (Brown *et al.*, 1996). L'étude de la sensibilité du modèle permet de déterminer la précision avec laquelle les paramètres doivent être connus (ECRIN, 2002 ; Dubus *et al.*, 2002). L'évaluation de la performance du modèle, c'est-à-dire sa capacité à reproduire un système réel, est fondamentale et doit être réalisée en comparant les prévisions du modèle à des données obtenues au champ (Carsel *et al.*, 1985 ; Parrish *et al.*, 1992 ; Dubus *et al.*, 2002). Enfin, la dernière étape consiste à caler le modèle en ajustant les variables d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les observations. Cette dernière phase est complexe, elle dépend de la paramétrisation, du choix du modèle et de la technique de calage (manuelle ou numérique, nombre de paramètres à modifier pour ajuster les simulations aux observations, cible de la calibration) (Dubus *et al.*, 2002).

#### 4.2 Modélisation du devenir des pesticides : Exemple du modèle PRZM

Pesticide Root Zone Model (PRZM) (Carsel *et al.*, 1998) est un modèle à une dimension qui simule les mouvements et les transformations des pesticides dans les sols aux alentours de la zone racinaire des plantes. Ce modèle a été largement testé et il est très performant par rapport à d'autres (Baer et Calvet, 1999). En outre, il s'agit d'un des modèles utilisés dans le cadre de l'homologation des pesticides en Europe. Le critère le plus important pour le choix de PRZM est la prise en compte, avec une description homogène et équilibrée, de la plupart des processus impliqués dans le devenir des herbicides dans l'environnement (dégradation, sorption, volatilisation, lixiviation, ...). Le modèle est constitué de deux modules : un module hydrologique et un module dérivant de la dynamique des solutés qui décrit le transport des produits chimiques (Figure 5).

Le mouvement de l'eau est déterminé en assimilant chaque horizon du sol à un réservoir : lorsque le contenu en eau d'un horizon dépasse la teneur en eau à la capacité au champ, l'eau en excès percole dans l'horizon inférieur. Le contenu limite inférieur en eau correspond au point de flétrissement permanent (Carsel *et al.*, 1998). Le modèle tient compte du ruissellement (par la technique des « Curve Numbers » (Gouy et Carlier, 2002)) et de l'érosion (à partir de l'Equation Universelle Modifiée de Perte des Sols), mais ces processus ne seront pas considérés dans ce travail en raison de l'absence de données expérimentales dans les sites étudiés. PRZM calcule, en fonction du temps, les concentrations et flux en pesticides (et pour deux métabolites au maximum) dans différents compartiments de l'environnement en phases solide, liquide et gazeuse. En phase liquide, la concentration en pesticides est égale au bilan des quantités de pesticides apportées au sol par application directe et par lessivage du feuillage, aux quantités transportées par diffusion, dispersion et convection, dégradées et transformées en métabolites, prélevées par les plantes et aux pertes par ruissellement et érosion. En phase adsorbée, la concentration en pesticides dépend de la masse volumique du sol et des pertes par érosion et dégradation. En phase gazeuse, elle dépend de la volatilisation (dispersion, diffusion) et de la dégradation.

Les entrées de PRZM sont nombreuses : ce sont des données relatives au milieu (sol, climat, ...), aux phénomènes (transport de l'eau, transport des solutés, rétention et dégradation) et, enfin, au mode d'application des pesticides et aux cultures.

Les études de sensibilité du modèle ont montré que les paramètres d'entrée ayant le plus d'influence sur la variabilité des résultats sont, en particulier, la capacité au champ, le point de flétrissement permanent, le coefficient d'adsorption et la constante de dégradation des pesticides (Dubus *et al.*, 2003 ; Mamy *et al.*, 2008).

Le modèle PRZM présente un certain nombre de limites dans la description des phénomènes impliqués dans le transport de l'eau et des pesticides : la description du transfert d'eau n'est pas continue (réservoirs), les écoulements latéraux ne sont pas pris en compte, les flux capillaires ascendants ne

sont pas simulés, des valeurs moyennes sont utilisées pour paramétrer les transports hydriques et chimiques ; or, elles ne représentent pas l'hétérogénéité des sols.

### 4.3. Résultats

Pour estimer à long terme les risques de contamination de l'environnement par les herbicides, plusieurs scénarios de successions culturales basés sur les rotations et itinéraires techniques existant sur les sites expérimentaux ont été élaborés : rotation colza-blé-betterave-blé et monoculture de maïs, avec introduction progressive des cultures GT de manière à obtenir une fréquence de retour de ces cultures dans la rotation variant entre 0 et 100 % (Tableau 5).

**Tableau 5 :** Description des successions culturales utilisées pour la modélisation du devenir des herbicides dans l'environnement

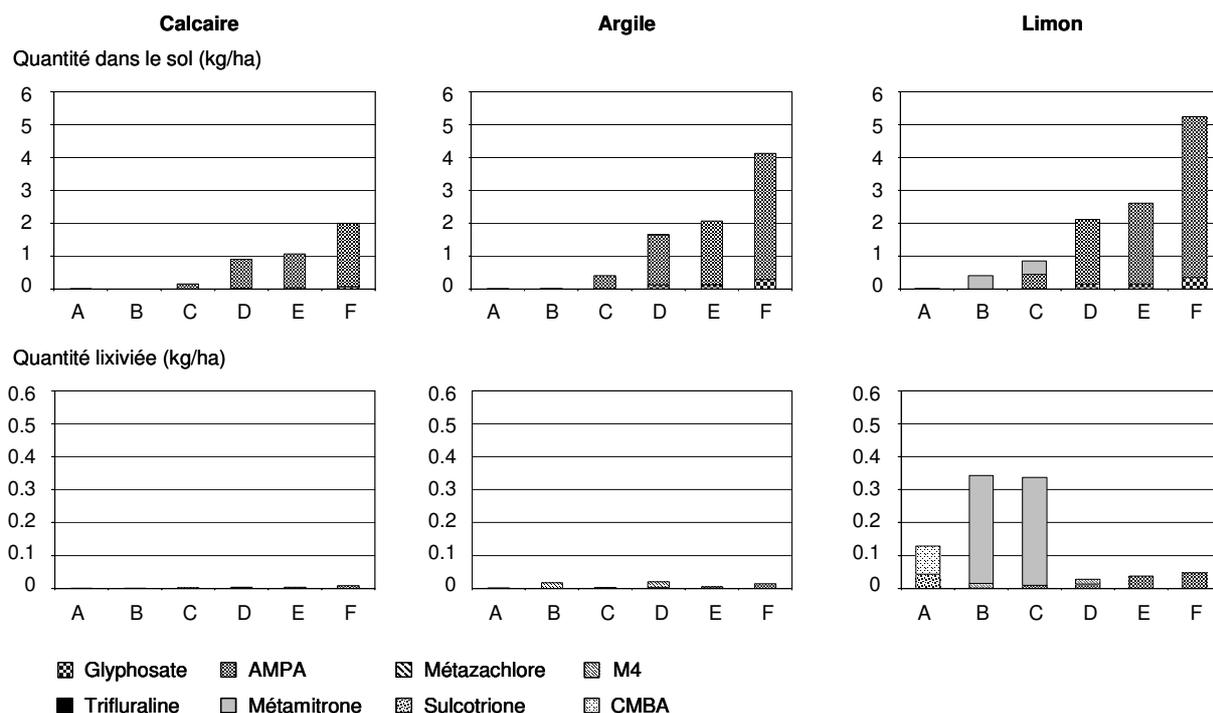
Successions culturales	Fréquence de retour des cultures GT (%)
Monoculture de Maïs	0
Colza – Blé – Betterave – Blé	0
Colza GT – Blé – Betterave – Blé	25
Colza – Blé – Betterave GT – Blé	25
Colza GT – Blé – Betterave GT – Blé	50
Monoculture de Maïs GT	100

Le modèle a été paramétré avec les données spécifiques aux sols, climats et pratiques culturales des régions étudiées et les données herbicides obtenues au laboratoire (Tableaux 2 et 3). Nous avons aussi réalisé une expérimentation en conditions de plein champ pour tester la capacité de PRZM à modéliser le devenir des herbicides étudiés. Le modèle permet des simulations acceptables du devenir des pesticides (Mamy *et al.*, 2008).

La Figure 6 présente les estimations obtenues par modélisation des stocks d'herbicides et de leurs métabolites dans les sols après 20 ans d'application, ainsi que les quantités lixiviées. Les flux volatilisés sont différents de zéro seulement dans le cas de la trifluraline, c'est pourquoi nous ne les avons pas représentés. Les résidus d'herbicides et de leurs métabolites dans les sols sont uniquement significatifs pour l'AMPA, le CMBA et la métamitronne. Les quantités restantes dans les sols sont très faibles ou nulles pour les autres herbicides (Figure 6). Les résidus d'AMPA augmentent lorsque le nombre de cultures GT introduites dans la rotation (i.e. la fréquence de retour du glyphosate) augmente (Figure 6). D'autre part, ils varient en fonction du type de sol. Ce résultat est la conséquence de la variabilité des paramètres d'entrée relatifs aux herbicides (Koc, DT50) utilisés dans le modèle et confirment la nécessité d'utiliser des paramètres appropriés inféodés aux conditions spécifiques des sols utilisés.

La modélisation prédit des quantités de glyphosate susceptibles d'être lixiviées égales à zéro quelque soit le type de sol. Ce résultat est en cohérence avec les coefficients d'adsorption très élevés de cet herbicide (Cf 2.2) et les valeurs des indices GUS ou de l'indicateur I-Phy (Cf 3). En revanche, après 20 ans d'application de glyphosate, le modèle prédit la lixiviation de l'AMPA en quantités significatives, en particulier dans le sol limoneux où le glyphosate était persistant. Les quantités d'AMPA qui pourraient atteindre les eaux souterraines sont supérieures à celles de la sulcotrione, mais inférieures à celles du CMBA, de M4 et de la métamitronne qui sont très élevées. Pour ces molécules, les résultats vont dans le sens des valeurs élevées de l'indice GUS.

Par conséquent, en terme de lixiviation, l'utilisation de cultures GT pourrait permettre de diminuer les risques de contamination des eaux souterraines.



**Figure 6** : Quantités dans le sol et quantités lixiviées des herbicides et de leurs métabolites dans les trois sols après 20 ans d'application (Mamy *et al.*, 2007). A : Monoculture de maïs ; B : Rotation Colza – Blé – Betterave – Blé ; C : Colza GT – Blé – Betterave – Blé ; D : Colza – Blé – Betterave GT – Blé ; E : Colza GT – Blé – Betterave GT – Blé ; F : Monoculture de maïs GT.

Les résultats obtenus par modélisation avec PRZM pour les différents systèmes de cultures testés montrent que si l'on considère les résidus des herbicides ou de leurs métabolites principaux après plusieurs applications, l'utilisation généralisée de cultures GT (assimilée à l'utilisation intensive du glyphosate) pourrait entraîner des phénomènes de contamination des sols importants. En revanche, si l'on considère la lixiviation ou la volatilisation, plus la fréquence de retour des cultures GT augmente et plus les risques de contamination de ces compartiments sont faibles.

Contrairement à l'indice GUS et à l'indicateur I-Phy, le modèle PRZM permet de mettre en évidence des différences liées aux propriétés pédologiques des sols (l'impact potentiel des cultures GT est plus important dans le sol limoneux) et de réaliser des évaluations à long terme des concentrations dans l'environnement. Cependant, cette modélisation numérique ne permet pas de déterminer le niveau de l'impact de ces concentrations.

## 5. Agrégation des impacts

### 5.1. Principe

A partir de la modélisation des concentrations en pesticides dans les différents compartiments de l'environnement (compartiments d'émission), la méthode de Huijbregts *et al.* (2000) permet de définir le niveau de leur impact sur les autres compartiments (compartiments cibles) et sur le compartiment d'émission lui-même, en affectant à chaque pesticide et couple « compartiment d'émission-compartiment cible », un potentiel de toxicité (TP) dont le calcul est décrit dans ce paragraphe. Cette

évaluation s'inscrit dans une démarche type « bilan environnemental », qui permet de prendre en compte simultanément les impacts sur différents milieux : sol, eau et atmosphère.

Les potentiels de toxicité ont été déterminés à l'aide du modèle USES 2.0 (Uniform System for the Evaluation of Substances, RIVM *et al.*, 1998) (Huijbregts *et al.*, 2000). Le devenir d'un kilogramme de pesticide émis dans l'air, l'eau douce, l'eau de mer, les sols agricoles et industriels est d'abord modélisé. A partir des concentrations obtenues, le modèle calcule ensuite des TER pour les cibles globales (eau douce, eau de mer, sédiments d'eau douce, sédiments marins, écosystèmes terrestres) et la population humaine. Pour les impacts sur l'eau, les écosystèmes et les sédiments, le TER est égal au rapport des PEC et PNEC. Pour l'impact sur la population humaine, le TER est égal au rapport des quantités ingérées et inhalées et des concentrations admissibles pour les mêmes voies d'exposition. Ensuite, les TER sont normés par ceux d'une substance de référence, le 1,4-dichlorobenzène, qui est pour la toxicité l'équivalent du CO<sub>2</sub> pour l'effet de serre, ce qui donne les potentiels de toxicité.

Pour chaque pesticide, trente potentiels de toxicité sont déterminés puisqu'il y a six catégories d'impact (eau douce, eau de mer, sédiments d'eau douce, sédiments marins, écosystèmes terrestres et hommes) et cinq compartiments d'émission (air, eau douce, eau de mer, sols agricoles et industriels). Les TP ayant été calculés avec les mêmes hypothèses de départ, ils permettront de comparer les pesticides entre eux.

La note d'impact d'un pesticide,  $N_{\text{Pesticide}}$ , sur une cible (population humaine, écosystèmes terrestres, ...) est obtenue en multipliant la concentration  $C$  obtenue avec PRZM (dans le sol, l'eau ou l'air) par le TP correspondant. Par exemple :

$$N_{\text{Pesticide}} = C_{\text{Sol}} \times TP_{\text{Sol} \rightarrow \text{Homme}}$$

Enfin, la note d'impact finale,  $N_f$ , d'un programme de désherbage est égale à la somme des notes d'impact obtenues pour chaque herbicide et métabolite impliqués dans le programme. Par exemple, pour une rotation colza-blé-betterave-blé GT ou non-GT :

$$N_f (\text{GT}) = N_{\text{Glyphosate}} + N_{\text{AMPA}}$$

$$N_f (\text{Non-GT}) = N_{\text{Trifluraline}} + N_{\text{Métazachlore}} + N_{\text{M4}} + N_{\text{Métamitron}}$$

Plus la note est élevée, plus l'impact est important.

Le modèle USES 2.0 présente un certain nombre de limites : il n'y a pas une séparation explicite entre les eaux souterraines et les eaux superficielles et la végétation terrestre n'est pas prise en compte. L'estimation des TP pour le milieu aquatique est réalisée par rapport au volume du compartiment et celle du milieu terrestre par rapport à la masse du compartiment, alors qu'une évaluation par rapport aux densités aurait été plus rigoureuse. Enfin, les PNEC terrestres ont été majoritairement estimées d'après les PNEC aquatiques par manque de données.

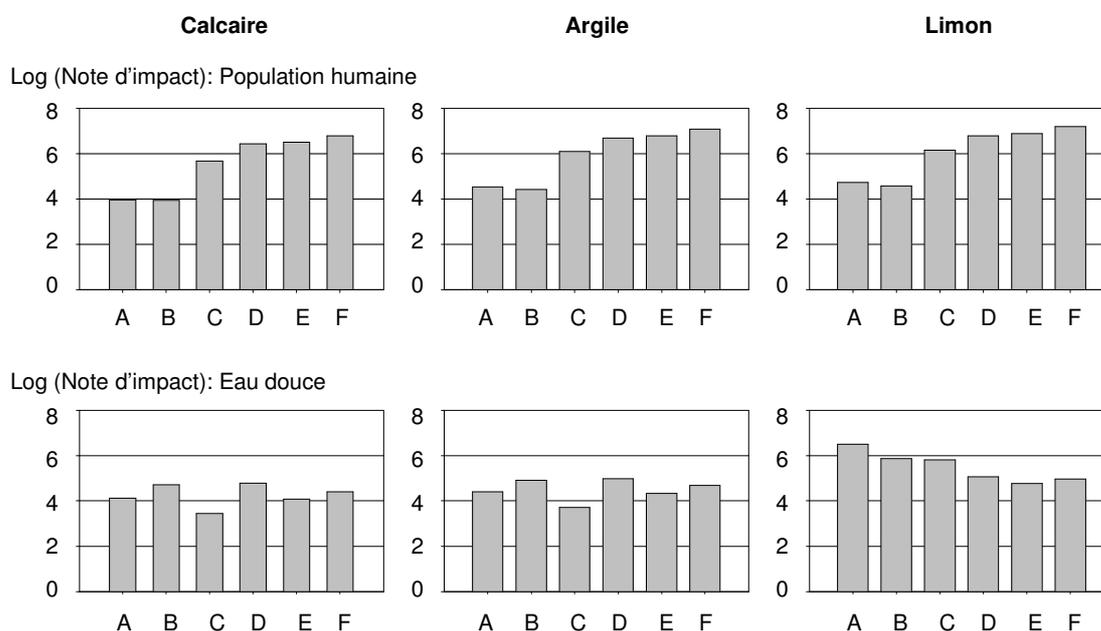
## 5.2. Résultats

D'une manière générale, l'impact des cultures GT sur la « population humaine », estimé par cette méthode, est élevé par rapport aux cultures classiques (Figure 7). Ce résultat est la conséquence de la persistance de l'AMPA, en particulier dans le sol limoneux. En revanche, pour l'eau douce, les impacts liés aux cultures GT sont plus faibles que ceux des cultures classiques.

Les résultats obtenus pour l'eau de mer, les écosystèmes et les sédiments (non présentés) montrent également un impact plus faible des cultures GT (Mamy, 2004).

Du point de vue de la contamination de l'environnement par les herbicides, les bénéfices des cultures GT dépendent des types de sol et des herbicides remplacés. La persistance de l'AMPA dans les sols

soulève néanmoins un problème général de durabilité de cette innovation et impose d'étudier plus en détail le comportement de cette molécule à long terme.



**Figure 7** : Notes d'impact des différents programmes de désherbage sur la population humaine et l'eau douce exprimées en Log(kg eq. 1,4-DCB/ha) (Mamy et al., 2007). A : Monoculture de maïs ; B : Rotation Colza – Blé – Betterave – Blé ; C : Colza GT – Blé – Betterave – Blé ; D : Colza – Blé – Betterave GT – Blé ; E : Colza GT – Blé – Betterave GT – Blé ; F : Monoculture de maïs GT.

## Conclusion

L'évaluation des risques environnementaux des pesticides constitue un enjeu croissant, en particulier pour la protection du milieu, et nécessite des méthodes d'évaluation intégrant différents types d'impacts.

L'objectif de cet article était de présenter les méthodes existantes d'évaluation des risques environnementaux des pesticides et de les comparer dans le cadre d'un exemple : l'évaluation des stratégies de désherbage des cultures résistantes ou non au glyphosate. Le choix des méthodes décrites n'est pas exhaustif mais se voulait représentatif de celles qui sont utilisées aussi bien par les professionnels que dans le cadre de l'homologation des pesticides.

Les méthodes simples reposant uniquement sur les techniques (comparaison du nombre de pesticides appliqués, des doses ou de l'IFT) ne permettent qu'une évaluation très limitée des risques. Elles donnent des indications sur l'intensité du recours aux pesticides donc sur l'exposition potentielle du milieu, mais elles ne fournissent pas une évaluation des risques environnementaux (Calvet et al., 2005) et sont totalement déconnectées des propriétés des molécules et du milieu.

La caractérisation de la mobilité et de la persistance permet de tenir compte des caractéristiques des sols. Cependant, l'évaluation basée uniquement sur les coefficients de rétention et les durées de demi-vie est incomplète dans la mesure où elle ne permet pas d'identifier des impacts sur une cible ni de connaître l'ampleur d'une pollution. De plus, ces paramètres sont obtenus au laboratoire, à court terme, et n'intègrent pas les variables agro-climatiques qui conditionnent le devenir des pesticides. Ils sont utiles dans la mesure où ils permettent de situer le caractère polluant des pesticides et de les classer

relativement les uns par rapport aux autres et de classer les milieux selon leur vulnérabilité (Calvet *et al.*, 2005).

Des méthodes de type indices, indicateurs ou bilans environnementaux fournissent une estimation de l'impact des pesticides sur l'eau, le sol ou l'air.

Les méthodes qualitatives telles que les indices (GUS) ou les indicateurs (I-Phy) considèrent quelques variables de l'environnement et donnent accès à un classement relatif de l'impact potentiel des pesticides sur certains compartiments de l'environnement. Elles sont simples à mettre en œuvre et ne requièrent que la connaissance des données nécessaires à leur calcul.

L'indice GUS permet de mettre en évidence l'effet du sol mais reste un indice peu précis. Il est uniquement basé sur deux caractéristiques des pesticides (DT50, Koc) qui sont souvent connues avec peu de précision et il ne tient pas compte du transport des pesticides tant du point de vue des propriétés du milieu que des phénomènes. Il ne donne qu'une indication sur la lixiviation potentielle.

L'indicateur I-Phy est basé sur une représentation très simplifiée des transferts mais il permet d'intégrer certaines données agro-pédo-climatiques et techniques.

Les méthodes quantitatives nécessitent l'utilisation de modèles numériques tel que PRZM. Elles conduisent à une estimation à long terme des flux et concentrations en pesticides dans l'environnement. La modélisation avec PRZM a permis de mettre en évidence un effet du sol, contrairement à l'indicateur I-Phy qui semblait peu discriminant à ce sujet. La prise en compte de la durée dans PRZM, de la variabilité climatique et pédologique (description dans le profil de sol) a permis d'affiner les résultats et d'aboutir à une comparaison des impacts des herbicides sur plusieurs compartiments de l'environnement (sol, eau, air). Enfin, ce modèle a mis en évidence le rôle déterminant du métabolite du glyphosate, l'AMPA, qui peut poser un problème à long terme. PRZM pourrait ainsi permettre d'identifier des sols ou systèmes de culture à risques.

Les modèles présentent néanmoins des limites dues à la description des processus (qui peuvent être mal décrits ou non décrits), des limites dues à la connaissance des milieux (la modélisation correcte du devenir des pesticides nécessite une bonne connaissance des caractéristiques pédo-géologiques, hydrologiques et climatiques du milieu) et des limites relatives aux modalités de mise en œuvre des modèles (difficultés liées aux changements d'échelles spatiale et temporelle des phénomènes simulés, à la sensibilité des modèles aux valeurs des paramètres d'entrée, à l'évaluation des performances des modèles) (ECRIN, 2002).

L'élaboration de « bilans environnementaux » à partir de méthodes d'agrégation des impacts est la méthode la plus complexe, reposant sur des modèles numériques qui simulent les mécanismes à l'origine des flux de matière intervenant dans les bilans. Elle permet de finaliser la comparaison entre les itinéraires techniques par le calcul de l'impact de chaque système de culture sur plusieurs compartiments cibles. Ainsi, la modélisation numérique couplée à une démarche d'agrégation des impacts représente un outil d'aide à la décision permettant d'accéder à un niveau de précision supérieur avec une discrimination des situations en fonction des conditions environnementales.

Si la comparaison des doses ou des quantités de pesticides utilisés est très favorable aux cultures GT, plus les méthodes d'évaluation utilisées sont précises et moins les cultures GT présentent d'avantages déterminants par rapport aux cultures conventionnelles. Ainsi, le bilan de l'introduction des cultures GT associées au désherbage au glyphosate est mitigé : la persistance de l'un de ses métabolites, l'AMPA, entraîne des risques d'accumulation de cette molécule dans les sols et elle a été observée en profondeur *in situ*. Cependant, dans ce bilan, tous les herbicides utilisés dans les pratiques de désherbage des cultures non-GT n'ont pas été pris en compte (seuls ceux qui sont le plus fréquemment utilisés ont été étudiés) et l'impact potentiel sur les autres cibles (eau, air, sédiments, écosystèmes) seraient plus faibles pour les cultures GT. Les résultats ont aussi montré que les bénéfices pour l'environnement des cultures GT dépendent du sol et des herbicides remplacés.

L'évaluation des risques est néanmoins assortie d'incertitudes liées i) au manque de données (par exemple, si il n'existe pas de mesure de Koc, une valeur estimée à partir des propriétés moléculaires du pesticide peut être utilisée) ; à la mesure des paramètres (Koc, DT50, ...) ou des concentrations, ii) aux conditions d'observation (à cause des variabilités spatio-temporelles des sols, du climat et des écosystèmes), iii) aux approximations introduites dans les modèles numériques de simulation pour effectuer des prévisions (Calvet *et al.*, 2005). Les prévisions des modèles sont généralement locales, c'est-à-dire qu'elles concernent l'échelle de la petite parcelle (quelques mètres carrés). Le passage de la petite parcelle à un bassin versant ou à une région nécessite l'utilisation de modèles intégrant un système d'information géographique (SIG). Cet outil informatique permet de gérer des données spatialement localisées pour produire, par exemple, des cartes de concentrations en pesticides dans les eaux souterraines à l'échelle d'une région ou d'un pays. Il nécessite de recourir à d'importantes bases de données sur les sols et les climats.

Bien que des progrès importants aient été accomplis sur les modèles de transfert de pesticides, les prévisions de ces modèles concernant les évolutions à long terme des contaminations à des échelles larges restent encore soumises à des incertitudes importantes. Il existe par ailleurs très peu de données pour traiter la question de la part relative des pollutions ponctuelles (cours de ferme, gestion des fonds de cuve des pulvérisateurs...) et diffuses (application agronomique), que ce soit en terme de contamination de l'environnement ou en terme d'impact (Aubertot *et al.*, 2005). D'autre part, des travaux associant une meilleure quantification de l'exposition des organismes aux pesticides et des effets qui en découlent permettront d'accéder à une meilleure évaluation du risque (ECRIN, 2002). Enfin, si l'objectif de la modélisation n'est pas de comparer des molécules entre elles, il est préférable d'utiliser plusieurs modèles comme le recommande l'EFSA (2004) dans le cadre de l'évaluation des risques pour l'homologation des pesticides. En effet, les différences de conception des modèles (et donc de description des processus) peuvent entraîner une disparité des résultats.

La prévention de la contamination de l'environnement doit aussi s'accompagner de mesures de gestion des risques. Ces mesures peuvent concerner les propriétés des pesticides (choisir des molécules fortement retenues et faiblement persistantes), les modalités d'application (réduire les doses, limiter les traitements préventifs, modifier les dates d'application), les milieux (identifier les milieux à risque c'est-à-dire, la présence de sols filtrants, de pente, d'une nappe d'eau ou d'un cours d'eau), l'aménagement de zones non traitées ou de zones tampons (bandes enherbées), les pratiques agricoles (mise en place de rotations, technique de labours) et le matériel (vérification des pulvérisateurs, gestion des fonds de cuve et des emballages).

L'amélioration des méthodes d'évaluation et le couplage entre évaluation et gestion des risques permettront de protéger plus efficacement l'environnement.

### Références bibliographiques

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (éditeurs), 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et CEMAGREF (France), 64 p.

Baer U., Calvet R., 1999. Fate of soil applied herbicides: experimental data and prediction of dissipation kinetics. *J. Environ. Qual.* 28, 1765-1777.

Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G., 1996. Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation. *Etud. Gest. Sols* 3/4, 279-295 (Numéro spécial).

Barriuso E., 2004. Evaluation des risques environnementaux des pesticides. INRA Editions, Paris, 123 p.

- Benbrook C.M., Sexson D.L., Wyman J.A., Stevenson W.R., Lynch S., Wallendal J., Diercks S., Van Haren R., Granadino C.A., 2002. Developing a pesticide risk assessment tool to monitor progress in reducing reliance on high-risk pesticide. *Am. J. Pota. Res.* 79, 183-199.
- Bockstaller C., Girardin P., Van der Werf H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Eur. J. Agron.* 7, 261-270.
- Bockstaller C., 2004. Elaboration et utilisation des indicateurs. Exemple de I-Phy. In : Barriuso, E. (Ed.) Estimation des risques environnementaux des pesticides, INRA, Paris, p 75-86.
- Boesten J.J.T.I., Van der Linden A.M.A., 1991. Modelling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. *J. Environ. Qual.* 20, 425-435.
- Brentrup F., Küsters J., Kuhlmann H., Lammel J., 2003. Environmental impact assessment of agricultural production systems using life cycle assessment methodology. II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *Eur. J. Agron.* 20, 265-279.
- Brown C.D., Baer U., Günther P., Trevisan M., Walker A., 1996. Ring test with the models LEACHP, PRZM-2 and VARLEACH: Variability between model users in prediction of pesticide leaching using a standard data set. *Pestic. Sci.* 47, 249-258.
- Calvet R., 1995. Modelling pesticide leaching in soils; main aspects and main difficulties. *Eur. J. Agron.* 4, 473-484.
- Calvet R., Barriuso E., Benoit P., Bedos C., Charnay M.P., Coquet Y., 2005. Les pesticides dans le sol. Conséquences agronomiques et environnementales. Editions France Agricoles, Paris, 637 p.
- Carsel R.F., Mulkey L.A., Lorber M.N., Baskin L.B., 1985. The Pesticide Root Zone Model (PRZM): a procedure for evaluating pesticide leaching threats to groundwater. *Ecol. Model.* 30, 49-69.
- Carsel R.F., Imhoff J.C., Hummel P.R., Cheplick J.M., Donigian A.S.Jr., 1998. PRZM 3, a model for predicting pesticide and nitrogen fate in the crop root and unsaturated soil zones: Users manual for release 3.12. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environment Protection Agency.
- Directive 91/414 CEE, 1991. Directive du Conseil du 15 juillet 1991 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques.
- Dubus I.G., Beulke S., Brown C.D., 2002. Calibration of pesticide leaching models: critical review and guidance for reporting. *Pest Manage. Sci.* 58, 745-758.
- ECOPHYTO 2018 (2008) Plan ECOPHYTO 2018 de réduction des usages de pesticides 2008-2018, [http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/phyto-2018-plan-pour/ecophyto-2018-plan-pour6154/downloadFile/FichierAttache\\_5\\_f0/PLAN\\_ECOPHYTO\\_2018.pdf?nocache=1221140711.3](http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/phyto-2018-plan-pour/ecophyto-2018-plan-pour6154/downloadFile/FichierAttache_5_f0/PLAN_ECOPHYTO_2018.pdf?nocache=1221140711.3)
- ECRIN, Club CRIN « Environnement et Société », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2002. Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement, ECRIN, Paris, 207 p.
- EFSA, 2004. Opinion of the Scientific Panel on Plant Health, Plant Protection Products and their Residues on a request of EFSA related to FOCUS groundwater models. *The EFSA Journal*, 93, 1-20.
- Gaillardon P., 2004. Evaluation du comportement environnemental des pesticides dans le cadre des procédures d'homologation. In : Barriuso E. (Ed.). Estimation des risques environnementaux des pesticides. INRA, Paris, p 25-40.
- Garratt J.A., Capri E., Trevisan M., Errera G., Wilkins R.M., 2002. Parametrisation, evaluation and comparison of pesticide leaching models to data from Bologna field site, Italy. *Pest Manage. Sci.* 58, 3-20.
- Girardin P., Bockstaller C., Merouzeau L., 1998. Estimation de l'impact sur l'environnement de traitements phytosanitaires pour des colzas transgéniques résistants au glyphosate ou au glufosinate. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 33, 89-90.
- Gouy V., Carlier N., 2002. Modélisation des phénomènes de transport : Transfert vers les eaux de surface. In : ECRIN, Club CRIN « Environnement et Société », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement. Paris, p 114-135.

- Gustafson D.I., 1989. Groundwater Ubiquity Score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ. Toxicol. Chem.* 8, 339-357
- Hornsby A.G., 1992. Site-specific pesticide recommendations: the final step in environmental impact prevention. *Weed Technol.* 6, 736-742.
- Huijbregts M.A.J., Thissen U., Guinée J.B., Jager T., Kalf D., van de Meent D., Ragas A.M.J., Wegener Sleeswijk A., Reijnders L., 2000. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere* 41, 541-573.
- Jarvis N., 1994. The MACRO model (Version 3.1). Technical description and sample simulation. Uppsala, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Science. Reports and dissertations.
- Levitan L., Merwin I., Kovach J., 1995. Assessing the relative environmental impacts of agricultural pesticides: the quest for a holistic method. *Agric. Ecosyst. Environ.* 55, 153-168.
- Levitan L., 1997. An overview of pesticide impact assessment systems (a.k.a "Pesticide Risk Indicator") based on indexing or ranking pesticides by environmental impact. Background paper prepared for the Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD). Workshop on Pesticide Risk Indicators, 21-23 April 1997, Copenhagen.
- Mamy L., 2004. Comparaison des impacts environnementaux des herbicides à large spectre et des herbicides sélectifs: caractérisation de leur devenir dans le sol et modélisation. Thèse de Doctorat Institut National Agronomique Paris-Grignon, 333 p. [http://www.inra.fr/ea/fichier\\_these/MAMY-L.pdf](http://www.inra.fr/ea/fichier_these/MAMY-L.pdf).
- Mamy L., Barriuso E., 2005. Glyphosate adsorption in soils compared to herbicides replaced as a result of the introduction of glyphosate resistant crops. *Chemosphere* 61, 844-855.
- Mamy L., Barriuso E., Gabrielle B., 2005. Environmental fate of herbicides trifluralin, metazachlor, metamitron and sulcotrione compared with that of glyphosate, a substitute broad spectrum herbicide for different glyphosate-resistant crops. *Pest Manage. Sci.* 61, 905-916.
- Mamy L., Barriuso E., 2007. Desorption and time-dependent sorption of herbicides in soils. *Eur. J. Soil Sci.* 58, 174-187.
- Mamy L., Gabrielle B., Barriuso E., 2007. Compared environmental balances of broad-spectrum and selective herbicides. In *Proceedings XIII Symposium in Pesticide Chemistry*, 3-6 Sept. 2007, Plaisance, Italie, p 332-339.
- Mamy L., Gabrielle B., Barriuso E., 2008. Measurement and modelling of glyphosate fate compared to that of herbicides replaced as a result of the introduction of glyphosate-resistant oilseed rape. *Pest Manage. Sci.*, 64, 262-275.
- Margni M., Rossier D., Crettaz P., Jolliet O., 2002. Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 379-392.
- Parrish R.S., Smith C.N., Fong F.K., 1992. Tests of the Pesticide Root Zone Model and the Aggregate Model for transport and transformation of aldicarb, metolachlor and bromide. *J. Environ. Qual.* 21, 685-697.
- Pingault N., 2007. Améliorer la qualité de l'eau : un indicateur pour favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires. Atelier OCDE, 19-21 mars 2007, Washington « Indicateurs de développement, de suivi et d'analyse des politiques agroenvironnementales », Ministère de l'agriculture et de la pêche, Paris.
- Real B., 2004. Démarche proposée par le CORPEN pour l'estimation des risques de contamination des eaux. In : Barriuso E. (Ed.). *Estimation des risques environnementaux des pesticides*. INRA, Paris, pp 87-103.
- Reus J., Leenderste P., Bockstaller C., Fomsgaard I., Gutsche V., Lewis K., Nilsson C., Pussemier L., Trevisan M., Van der Werf H.M.G., Alfarroba F., Blümel S., Isart J., McGrath D., Seppälä T., 2002. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. *Agric. Ecosyst. Environ.* 90, 177-187.
- RIVM, VROM, VWS, 1998. Uniform System for the Evaluation of Substances 2.0 (USES 2.0). RIVM report no. 679102044, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Ministry of Health, Welfare and Sport (VWS).

Trevisan M., Errera G., Goerlitz G., Remy B., Sweeney P., 2000. Modelling ethoprophos and bentazone fate in a sandy humic soil with primary pesticide fate model PRZM-2. *Agric. Water Manage.* 44, 317-335.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess – LCA 101, 2001. Retrieved from <http://www.epa.gov/ORD/NRMLR/lcaccess/lca101.htm>

Van der Werf H.M.G., 1996. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 60, 81-96.

Van der Werf H.M.G., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225-2249.

Worrall F., Wooff D.A., Seheult H., Coolen F.P.A., 2000. New approaches to assessing the risk of groundwater contamination by pesticides. *J. Geol. Soc., London* 157, 877-884.

## **Vers un usage raisonné des herbicides : analyse des pratiques en blé d'hiver de 2004 à 2006**

**J. Gasquez<sup>1</sup>, G. Fried<sup>2</sup>, M. Délos<sup>3</sup>, C. Gauvrit<sup>1</sup>, X. Reboud<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>: INRA, Unité Mixte de Recherche n°1210, INRA, Univ. Bourgogne, ENESAD, Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon cedex, France

<sup>2</sup>: LNPV, Station d'entomologie, SupAgro Bâtiment 18, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 01, France

<sup>3</sup>: SRPV-DRAF "Midi-Pyrénées" - Bât. E - Bd Armand Duportal - 31074 Toulouse, France

Correspondance : Jacques.Gasquez@dijon.inra.fr

### **Résumé**

Grâce à la mise en place, depuis plusieurs années à l'échelle nationale, du réseau Biovigilance Flore qui permet d'étudier les relations entre la flore adventice, les variables du milieu et les systèmes de culture, nous avons étudié 779 stations de blés d'hiver régulièrement réparties sur les années 2004, 2005 et 2006.

Nous avons analysé le nombre et les dates des traitements herbicides, le nombre de produits et les doses appliquées. Nous avons observé que la réduction de l'utilisation des herbicides sur la culture du blé d'hiver est déjà très avancée puisque les 2/3 des parcelles ne reçoivent, au printemps, qu'un seul traitement avec généralement un seul produit commercial appliqué en moyenne aux 2/3 de la dose homologuée. Les molécules les plus utilisées appartiennent à la famille des sulfonyleurées et s'appliquent à des doses de 6 à 30 g/ha suivant les molécules.

Cette étude préliminaire conduit à identifier certaines limites liées à une réduction supplémentaire de 50% des traitements herbicides en blé pour un agriculteur conventionnel sans prendre un fort risque de perte d'efficacité du contrôle, de réduction du rendement, de salissement des parcelles ou de sélection de plantes résistantes aux herbicides mais aussi de risque sanitaire lié à la présence accrue d'adventices

Adventices, herbicides du blé, nombre de traitements, réduction des traitements

### **Abstract**

A network called « Biovigilance Flore » has been running in France for the last five years. It has been designed to assess the relationships between the weed species growing in a field, the characteristics of the environment and the cropping system. Among these data, winter wheat fields were studied. A total of 779 fields regularly distributed over 2004, 2005 and 2006 were assessed.

We analysed number of herbicide treatments and date of applications, total number of sprayed products and their doses. We found that there is an ongoing herbicide use reduction in winter wheat fields in France. 2/3 of fields were sprayed only once with only one formulated product at 2/3 of the registered dose. The most commonly used molecules were sulfonyleureas sprayed from 6 g/ha to 30 g/ha according to the molecule.

This first study raised the question about the suitability of an herbicide drop-off. Could farmers reduce up to 50% their herbicide treatments in winter wheat without facing a major drop in control efficacy, an increase of weed infestations and selection of herbicide resistant populations?

## Introduction

Les herbicides sont les pesticides les plus fréquemment détectés et avec les niveaux de détection les plus élevés dans les eaux de surface et souterraines (rapports IFEN 2004 et 2005). Déjà, le dossier « Pesticides et Environnement » de l'INRA de 2005 s'appuyant sur l'exemple des Danois qui ont réduit de 40% les quantités utilisées depuis le milieu des années 80, postulait qu'il devait être possible de réduire la consommation en France. Parmi les mesures préconisées par le « Grenelle de l'environnement » en 2007, au-delà de la suppression de produits considérés comme dangereux dans le cadre du plan interministériel de réduction des risques liés aux pesticides 2006-2009, l'engagement 129 se donnait comme objectif de réduire de moitié l'usage des pesticides avant 2012 en demandant la mise au point accélérée de méthodes alternatives ([legrenelle-environnement.fr](http://legrenelle-environnement.fr)<sup>1</sup>). Reprenant ces propositions en 2008, le ministère de l'Agriculture préconise une réduction de 50% en 10 ans ([agriculture.gouv.fr](http://agriculture.gouv.fr)). Cependant, les modalités de réduction ne sont pas précisées et peuvent être multiples. Elles peuvent concerner soit le grammage, ce qui aurait pour conséquence de favoriser l'usage de produits homologués à des doses de plus en plus faibles, avec la sélection de certaines familles d'herbicides efficaces à faible dose, soit la dose appliquée par rapport à la dose homologuée. Cette seconde option pourrait générer des problèmes d'efficacité (risque de développement de résistance favorisée par des efficacités trop faibles) et avoir des conséquences environnementales indirectes car des efficacités qui s'avèreraient trop faibles, pourraient exiger des traitements supplémentaires pour un résultat acceptable. Une troisième possibilité serait la diminution du nombre de traitements par campagne pour mieux cibler les traitements au problème rencontré dans chaque parcelle. Cela tendra à favoriser les associations de molécules assurant un large spectre d'action. Le risque existe d'une combinaison de ces trois options qui cumulerait leurs différents défauts.

Dans une parcelle cultivée en agriculture conventionnelle en France, on cherchera à « contrôler » les adventices (c'est-à-dire en détruire le maximum à un coût acceptable) qui se développent dans une culture pour mettre en place les conditions d'un rendement maximum. Le but est, d'une part, éviter les pertes de rendement par concurrence, voire le salissement de la récolte, mais surtout de limiter la production de semences qui entraînerait une augmentation du stock semencier de la parcelle pendant de longues années reportant ainsi l'augmentation du coût du désherbage sur les cultures suivantes. Contrairement au contrôle des maladies et des insectes, la gestion des adventices doit intégrer une dimension temporelle pouvant dépasser 5 ans.

Sur la période 2001-03 en Europe de l'ouest, les estimations de l'ensemble des pertes potentielles en grande culture sont d'environ 60% du rendement optimal et les pertes effectives constatées après contrôle sont encore d'environ 17%. Près de la moitié de ces pertes potentielles peut être attribuée aux adventices, mais ce sont aussi les bio-agresseurs qui sont le mieux contrôlés avec une réduction effective de 75% de leur nuisibilité (Oerke, 2006). De plus, on note aussi une relative stabilité de l'efficacité des contrôles depuis la fin des années 60 (Oerke, 2006), montrant, comme le soulignait déjà Barralis en 1978, une stabilisation des seuils d'efficacité (c'est à dire du nombre d'adventices levées). Par ailleurs, la généralisation des traitements herbicides a eu pour effet de réduire fortement les stocks de semences dans les sols (Fried et al., 2008). Dès les années 70, on a pu montrer une forte régression des stocks de plusieurs ordres de grandeur, avec des réductions par le seul fait des herbicides d'un facteur deux à trois en cinq ans (Barralis, 1978) pour se stabiliser vers mille à deux mille semences par m<sup>2</sup>.

Rappelons que :

- pour être efficace sur une espèce, un herbicide doit être appliqué à une dose suffisante,

---

<sup>1</sup> Lorsque le texte fait référence à des documents disponibles en ligne, l'URL exact du site est donné dans la liste des références bibliographiques en fin de ce texte.

- le taux de contrôle ne varie pas linéairement avec la dose,
- le fait de laisser des plantes sur le terrain par suite d'un traitement insuffisamment efficace entraîne le salissement de la parcelle,
- par un effet de sélection, des génotypes résistants peuvent être favorisés et devenir dominants par la suite si la même pression est maintenue,
- certains produits à large spectre contrôlent d'autant plus d'espèces que la dose est proche de la valeur homologuée, la réduction de dose ne garantira donc pas le contrôle de toutes les espèces visées ce qui pourrait conduire l'agriculteur à faire un traitement spécifique supplémentaire pour les espèces nécessitant les doses les plus élevées.

La flore d'une parcelle est composite avec au moins dix espèces principales (avant désherbage) avec des comportements très différents (Fried, 2007). A l'exception notable des variétés génétiquement modifiées qui sont résistantes au glyphosate ou au glufosinate, il est généralement impossible de contrôler l'ensemble des espèces d'une communauté adventice avec une seule matière active : il faut au minimum une matière active antigraminées et une matière active antidycolédones.

Si le « Grenelle de l'environnement » a insisté sur la nécessité d'amplifier les efforts de réduction d'utilisation des pesticides, différents acteurs de la protection des cultures ont indiqué que l'évolution était déjà bien engagée depuis une dizaine d'années, sous-entendant par là que la marge de « progrès » en terme de réduction de la quantité de pesticides était désormais réduite. Ainsi, entre 1999 et 2006, le tonnage de pesticides vendu en France a baissé de 40% (uipp.org) atteignant même des niveaux où le moindre accident peut entraîner une augmentation des usages (+7% en 2007 à cause du mildiou en pomme de terre et vigne).

Nous avons donc voulu dégager une vision plus claire de l'utilisation des herbicides. Pour cela, nous avons cherché à dresser un constat de la situation réelle des pratiques de désherbage avec des données issues du terrain via l'analyse des enquêtes du réseau biovigilance (Delos *et al.*, 2006 ; Fried *et al.*, 2007) sur la culture la plus répandue en France, à savoir le blé d'hiver.

## Matériel et méthodes

Depuis cinq ans dans le cadre de la « Biovigilance Flore », le Service de la Protection des Végétaux commandite aux FREDON et FREDEC un suivi annuel de la flore adventice dans un réseau d'environ 1000 parcelles plus ou moins fixes, localisées sur tout le territoire avec une distribution proportionnelle à l'importance des principales cultures dans chaque région. L'originalité de ce suivi réside dans le fait que plusieurs relevés sont effectués au cours d'une campagne et que l'effet des herbicides peut être estimé par l'analyse comparée des relevés dans l'ensemble de la parcelle traitée et de ceux d'une zone témoin non désherbée. En plus des relevés comprenant la liste des espèces affectées d'un coefficient d'abondance, chaque parcelle est caractérisée par des données environnementales (localisation dans le paysage, type de sol) et surtout, chaque année, par les pratiques de l'agriculteur : successions culturales, travaux de l'interculture, de préparation du semis et ensemble des traitements (produits, doses). Ces données permettent de chercher les relations entre les caractéristiques environnementales de parcelles, le système de culture de l'agriculteur et les espèces adventices présentes sur la parcelle. La possibilité d'avoir des parcelles suivies tous les ans permettra aussi de mesurer le poids de l'historique sur la distribution des espèces (Fried, 2007)

Pour cette première étude, nous avons décidé de nous limiter au suivi des blés dur et tendre d'hiver sur trois années complètement dépouillées 2004, 2005 et 2006 qui présentent l'avantage d'avoir très peu de parcelles suivies deux fois au cours de cette période. Cette culture, outre le fait qu'elle est la plus importante sur le territoire ( $5.2 \times 10^6$  ha en 2007), présente de ce fait une flore diversifiée (avec un développement récent de plusieurs résistances à différents herbicides). De plus, les agriculteurs

disposent d'une gamme assez large de molécules pour gérer les différents types d'adventices et les conditions de culture permettent des traitements échelonnés de septembre à mai. Cette analyse avait pour objectif de répertorier l'ensemble des herbicides appliqués pendant une campagne pour tenter d'avoir un état des lieux de ce qui est réellement appliqué sur tout le territoire quelles que soient les adventices présentes. Nous avons ainsi recherché combien de traitements sont appliqués, combien les agriculteurs mettaient de produits en œuvre, à quelles dates et surtout à quelles doses. De plus, il nous a semblé intéressant de savoir, parmi la large gamme de matières actives disponibles, quelles étaient les plus utilisées et en quelles proportions et combien de passages étaient réalisés pour les différents produits utilisés. Nous avons ainsi analysé les données de 779 relevés (260, 325 et 194 respectivement de 2004 à 2006). Malheureusement le nombre limité d'années étudiées, s'il nous donne un bon état des lieux à un moment donné, n'a pas beaucoup de pertinence pour mesurer une évolution éventuelle.

## Résultats

### 1) Nombre de traitements par campagne

Même si quelques rares parcelles ont pu recevoir plus de trois traitements, sur la très large majorité d'entre elles (environ les 2/3 - Figure 1), l'agriculteur s'est contenté d'un passage pour assurer la gestion de l'ensemble des adventices. Par ailleurs, on peut observer une augmentation régulière de cette stratégie. Bien que moins importante, la proportion de parcelles recevant deux traitements ne semble pas trop affectée rendant peut-être compte par là d'une certaine stabilité des agriculteurs appliquant encore un programme fondé sur un traitement d'automne associé à un traitement de printemps.

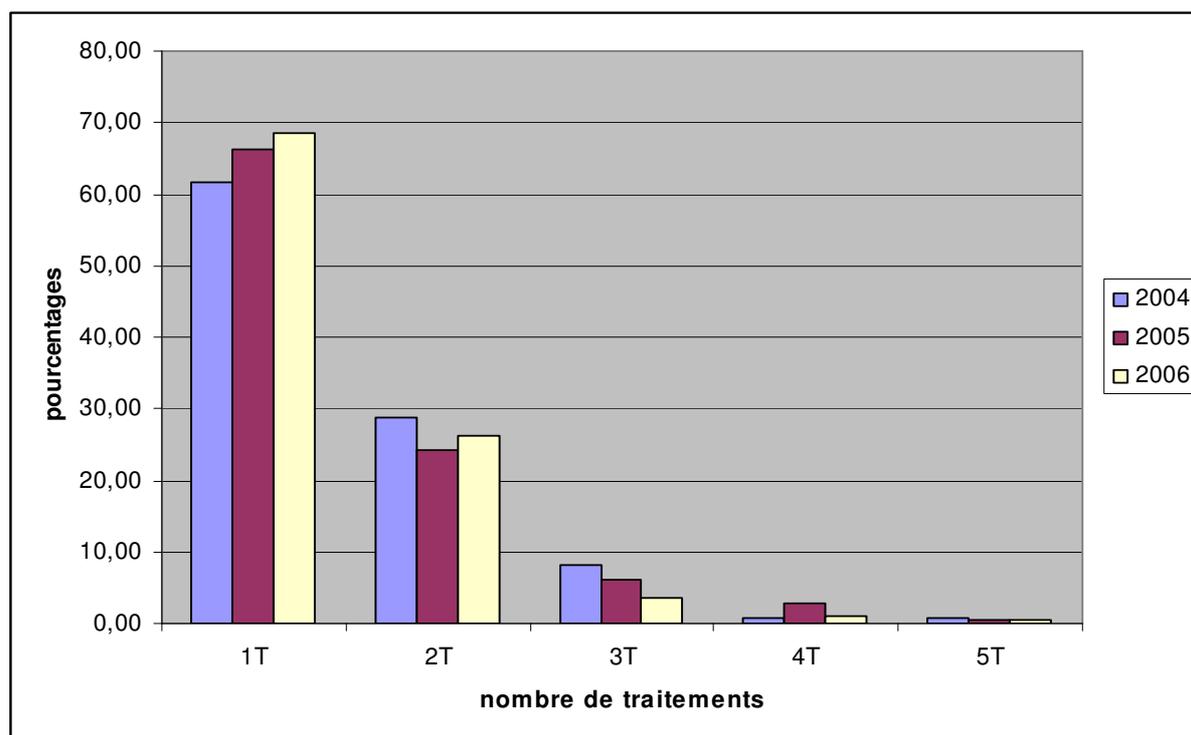
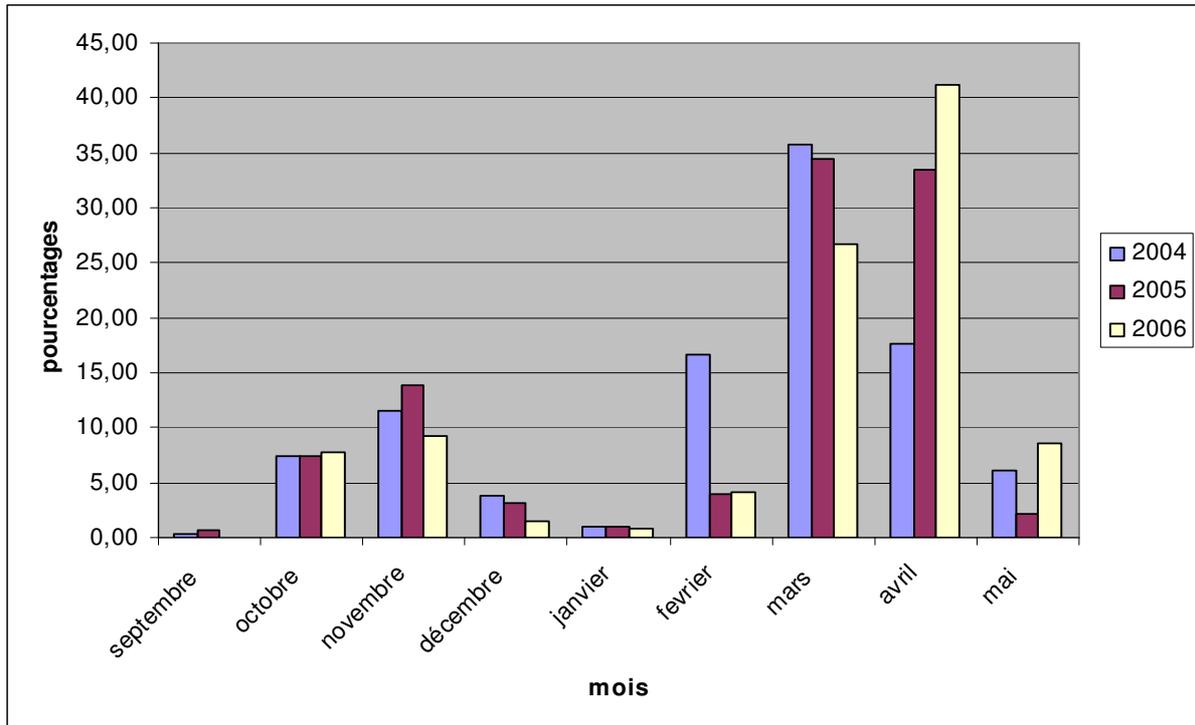


Figure 1 : Distribution du nombre d'opérations de désherbage sur blé d'hiver par campagne sur les trois années

### 2) Dates de traitements

On peut voir sur la figure 2 que, pour 2004, les traitements se distribuent selon une courbe bimodale avec des traitements d'automne centrés sur novembre et des traitements de printemps centrés sur mars.

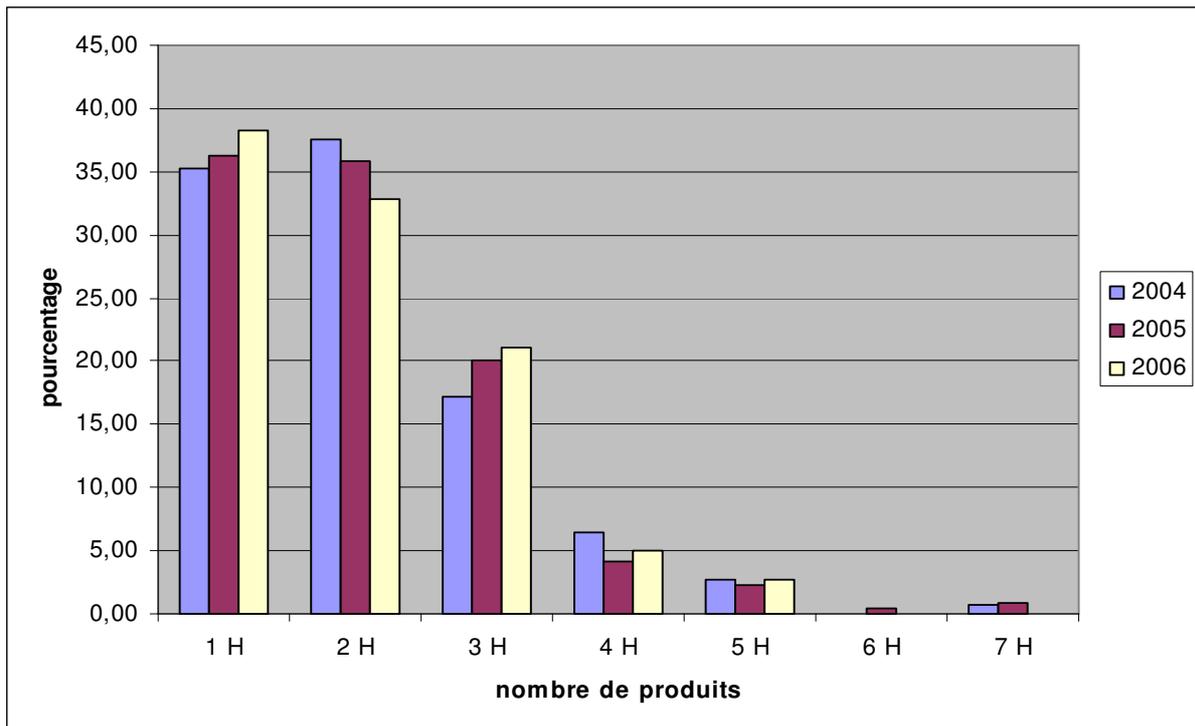


**Figure 2** : Distribution des dates de traitements sur blé d'hiver au cours des campagnes sur les trois années

Cependant, les autres années montrent un glissement vers les traitements de printemps de plus en plus tardifs, traduisant vraisemblablement l'augmentation des parcelles ne recevant qu'un traitement que l'agriculteur devra retarder le plus possible pour atteindre le maximum de plantes levées, puisqu'il a fait le choix d'un seul traitement avec le risque de laisser une compétition précoce s'installer entre l'espèce cultivée et les adventices. Cette stratégie suppose un suivi régulier de la flore.

### 3) Nombre de produits commerciaux appliqués

Quelques rares parcelles ont reçu quatre produits formulés et plus (jusqu'à sept), mais plus des deux tiers n'en ont reçu qu'un ou deux (Figure 3), ce qui est bien en corrélation avec le fait que les agriculteurs ne sont passés qu'une fois sur une très large majorité de parcelles. On observe encore une légère augmentation du nombre de parcelles traitées avec un seul herbicide essentiellement au détriment du nombre de parcelles recevant deux herbicides. Paradoxalement, les parcelles gérées avec trois herbicides augmentent aussi.



**Figure 3** : Nombre de produits formulés appliqués sur blé d'hiver sur l'ensemble des campagnes au cours des trois années

#### 4) Quantités totales d'herbicide appliquées

Les quantités d'herbicide appliquées ont été étudiées en sommant l'ensemble des produits appliqués au cours d'une campagne à partir du semis. La médiane se situe entre les classes 51-100 % et 101-150 %, surtout pour l'année 2006 qui montre une nette réduction du total appliqué par rapport à 2004 (Figure 4). La moyenne de ces valeurs tend à diminuer et est inférieure à 1.5 dose homologuée. De très rares cas atteignent et dépassent trois fois une dose homologuée. Ces valeurs calculées ne représentent pas exactement l'indice de fréquence des traitements (IFT herbicide moyen) puisque nous n'avons pas tenu compte des rares applications de glyphosate (moins de 10%) dans l'interculture précédente. Elle est très légèrement inférieure à la valeur de référence de 2008 pour la France entière (1.64)

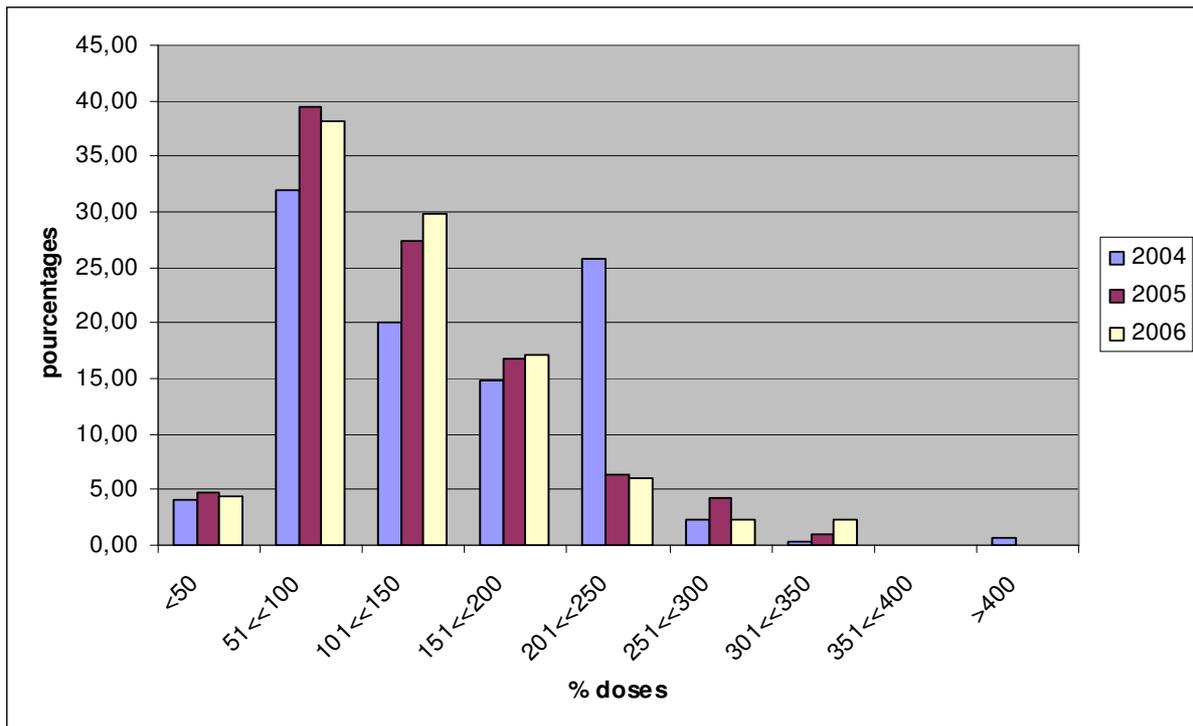


Figure 4 : Quantités totales appliquées par rapport à des doses homologuées sur les trois années

##### 5) Quelles sont les matières actives utilisées ?

Environ 33 matières actives (distribuées dans de nombreuses spécialités commerciales) ont été utilisées, ce qui, compte tenu des évolutions dans les homologations, correspond à la quasi totalité des matières actives autorisées sur blé (Tableau I). Les dix premières molécules représentent les trois quarts des traitements et les cinq premières déjà la moitié. Ainsi, même si l'ensemble des matières à disposition est utilisé, la majorité du désherbage repose sur un petit nombre de molécules. Parmi ces premières molécules, le phénomène le plus marquant est le recul net de l'isoproturon qui passe du second rang avec 11% en 2004 au sixième avec 6.5% en 2006. On peut aussi noter que si le iodosulfuron est toujours la première molécule utilisée, on peut observer un glissement vers l'usage prépondérant de sulfonilurées puisque en 2006 les trois premières molécules sont des sulfonilurées et il y en a quatre dans les sept premières molécules utilisées.

Si, en moyenne, ces produits sont appliqués aux deux tiers de la dose homologuée, la plupart des molécules sont toujours appliquées aux mêmes doses qu'elles soient fortes ou faibles. Les deux ou trois molécules les plus utilisées le sont généralement aux trois quarts de la dose. Mais, paradoxalement certaines molécules sont toujours appliquées à des doses très basses (50% et parfois moins). Même si elles entrent généralement dans des associations, souvent elles-mêmes mélangées par l'agriculteur, on peut cependant se demander pourquoi on les utilise toujours à de si faibles doses. L'exemple type est le bifénox qui est toujours en association et dont les doses moyennes oscillent de 26, 43 à 36% de 2004 à 2006.

##### 6) Quelles sont les matières actives utilisées dans des traitements uniques ?

Devant ce glissement dans les usages des différentes molécules, il nous a semblé intéressant de rechercher les molécules que les agriculteurs utilisaient lorsqu'ils géraient les adventices par un seul traitement. En effet, non seulement la proportion de parcelles gérées avec un seul traitement augmente

(plus de 60% - Figure 1), mais la proportion des parcelles qui ne reçoivent qu'un seul produit commercial passe de 36 % à 42.8 % du total entre 2004 et 2006. On remarque que les produits utilisés sont des associations de deux ou trois matières actives pour assurer la gestion de l'ensemble des espèces présentes. L'association la plus utilisée est le mésosulfuron associé au iodofuron qui passe de 32.6 % à 42.4 % de ces traitements. En revanche, l'association iodofuron-fénoxaprop régresse très fortement passant de 22.8 % à 8.2 %. On observe la même chose avec l'association DFF-isoproturon qui passe de 15.2% à 5.9% certainement à cause de la régression de l'isoproturon. Ainsi les trois quarts de ces parcelles sont gérées avec seulement quatre ou cinq associations (tableau II)

**Tableau 1** : Doses (% dose homologuée) et fréquences (%) des molécules utilisées durant les trois années

2004	dose	Fr	2005	dose	Fr	2006	dose	Fr
iodofuron	73	13,2	iodofuron	65	12,2	iodofuron	73	15,3
isoproturon	72	11,0	isoproturon	77	10,0	mésosulfuron	74	13,7
mésosulfuron	83	9,6	mésosulfuron	63	9,6	metsulfuron	69	8,5
DFF	68	8,2	metsulfuron	64	7,8	DFF	69	7,9
ioxynil	55	8,1	DFF	60	7,0	ioxynil	54	7,6
metsulfuron	64	6,3	ioxynil	59	6,6	isoproturon	77	6,5
bromoxynil	56	5,6	mecoprop	59	5,8	thifensulfuron	77	5,8
clodinafop	65	4,6	clodinafop	58	4,5	bromoxynil	56	5,6
mecoprop	56	4,1	bromoxynil	51	4,1	mecoprop	60	4,9
fluroxypyr	58	3,7	24MCPA	78	3,6	florasulam	43	4,0
fénoxaprop	70	3,6	fénoxaprop	50	3,5	fluroxypyr	56	2,5
24MCPA	77	3,1	fluroxypyr	48	3,1	bifénox	36	1,8
clopyralide	73	2,3	clopyralide	72	2,7	chlortoluron	66	1,8
chlortoluron	87	2,2	thifensulfuron	70	2,6	clodinafop	64	1,8
thifensulfuron	60	2,1	24D	81	2,4	fénoxaprop	56	1,8
florasulam	53	2,0	bifénox	43	2,1	24MCPA	77	1,2
bifénox	26	1,6	carfentrazone	69	2,0	amidofuron	31	1,1
diclofop	71	1,3	florasulam	46	1,6	carfentrazone	86	1,1
amidofuron	33	1,2	amidofuron	31	1,5	flupyrsulfuron	68	1,1
carfentrazone	65	0,9	chlortoluron	86	1,4	clopyralide	83	1,1
24D	78	0,8	isoxabén	79	1,0	pyraflufen	64	0,7
flupyrsulfuron	85	0,7	flupyrsulfuron	81	0,9	24D	85	0,5
isoxabén	72	0,7	propoxycarbazone	48	0,7	diclofop	36	0,5
linuron	92	0,5	tribenuron	68	0,7	isoxabén	94	0,5
imazamétabenz	78	0,3	linuron	80	0,5	tribenuron	73	0,5
propoxycarbazone	83	0,3	trifluraline	80	0,5	imazamétabenz	75	0,4
tribenuron	63	0,3	prosulfocarb	80	0,4	linuron	88	0,4
trifluraline	92	0,3	dichlorprop	60	0,2	trifluraline	88	0,4
dichlorprop	84	0,2	pyraflufen	83	0,2	dichlorprop	58	0,2
prosulfocarb	75	0,2	sulfosulfuron	48	0,2	flurtamone	70	0,2
pyraflufen	90	0,2	diclofop	29	0,1	prosulfocarb	50	0,2
sulfosulfuron	50	0,2	flurtamone	50	0,1	sulfosulfuron	44	0,2
pendiméthaline	50	0,1	pendiméthaline	52	0,1	pendiméthaline	50	0,2
			picolinafen	52	0,1	picolinafen	50	0,2
						propoxycarbazone	60	0,2
<b>dose moyenne</b>	68			62			64	

Tableau II : Fréquences des associations de produits formulés appliquées seules en un seul passage sur toute la campagne durant les trois années.

2004			2005			2006		
mésosulfuron	iodosulfuron	32,6	mésosulfuron	iodosulfuron		mésosulfuron	iodosulfuron	42,4
iodosulfuron	fenoxaprop	22,8	iodosulfuron	fenoxaprop		iodosulfuron	fenoxaprop	8,2
DFE	Isoproturon	15,2	DFE	Isoproturon		DFE	ioxynil	8,2
fluroxypyr	clopyralid	4,3	metsulfuron			DFE	isoproturon	5,9
metsulfuron		3,3	isoxaben	linuron	trifluraline	ioxynil	mecoprop	5,9
isoxaben	linuron	3,3	bromoxynil	ioxynil	mecoprop	metsulfuron		4,7
DFE	ioxynil	3,3	clodinafop	mecoprop		metsulfuron	thifensulfuron	4,7
Isoproturon		2,2	ioxynil	mecoprop		isoxaben	trifluraline	2,4
bromoxynil	ioxynil	2,2	metsulfuron	thifensulfuron		Isoproturon	pyraflufen	2,4
carfentrazone	metsulfuron	1,1	fluroxypyr	clopyralid	24MCPA	DFE	chlortoluron	2,4
clodinafop		1,1	isoxaben	chlorto		ioxynil	mecoprop	2,4
Isoproturon	pyraflufen	1,1	24D			Isoproturon		2,4
DFE	chlortoluron	1,1	tribenuron			carfentrazone		1,2
flupyrulfuron	thifensulfuron	1,1	picolinafen	pendiméthalin		bromoxynil	ioxynil	1,2
clodinafop	ioxynil	1,1	chlortoluron			clodinafop		1,2
Metsulfuron	thifensulfuron	1,1	prosulfocarb			chlortoluron		1,2
Isoproturon	pendiméthalin	1,1	mecoprop	dichlorprop	24MCPA	24D		1,2
ioxynil	mecoprop	1,1	tribenuron	thifensulfuron		mecoprop	dichlorprop	1,2
24MCPA		1,1	flupyr	metsulfuron		clopyralid	24MCPA	1,2
			clodinafop	ioxynil	mecoprop			
			tribenuron	thifensulfuron				
			Isoproturon					
			florasulam	fluroxypyr				
			bifenox	DFE	isoproturon			

## Analyse critique et réflexions sur les possibilités d'évolution

Le réseau Biovigilance Flore qui assure le suivi annuel de la flore sur tout le territoire, a permis de recueillir des éléments chiffrés et fondés pour apporter des réponses encore partielles mais objectives aux questions que se pose la société sur l'utilisation des herbicides et la responsabilité des agriculteurs sur les risques de pollution. La pérennisation d'un tel système est essentielle pour décrire de façon objective l'évolution des pratiques et mettre en relation, grâce à des données réelles, les variations de la flore et celles des systèmes de culture et donc de donner un caractère prédictif quant aux stratégies à appliquer pour éviter des problèmes observés par ailleurs.

L'analyse des données recueillies sur le réseau Biovigilance Flore montre que, déjà en 2006, les agriculteurs ont très largement anticipé une tendance qui a été formalisée dans les directives liées au « Grenelle de l'environnement ». En effet, l'ensemble des contraintes économiques et environnementales a conduit les agriculteurs à réduire le nombre de passages, puisque plus des deux tiers ne faisaient plus qu'un seul traitement réalisé forcément tardivement (fin mars, début avril) au risque de perdre du rendement par l'effet de concurrence de certaines espèces pendant l'automne et à la reprise de végétation. De même, on observe que les doses appliquées se situent déjà en moyenne aux deux tiers de la dose homologuée avec des produits aux doses d'usage de grammage faible. Il apparaît alors un risque majeur de ne favoriser qu'un seul groupe d'herbicides homologués aux plus faibles grammages. Actuellement, les herbicides inhibiteurs de l'ALS, qui appartiennent à la famille des sulfonylurées (de 6g/ha à 38g/ha suivant la molécule), satisfont le mieux à ces contraintes et notamment l'association mésosulfuron-iodosulfuron (environ 15% des parcelles). Or, le risque de résistance est si fort que dès la quatrième année d'homologation de cette association, des vulpins et des ray-grass étaient déjà sélectionnés au point d'empêcher tout contrôle dans certaines parcelles (Gasquez, 2007). Ces développements de résistance devraient s'étendre à d'autres espèces comme les dicotylédones (cf liste des espèces résistantes aux inhibiteurs d'ALS dans le monde (Heap, 2008), où l'on note l'apparition des premiers coquelicots résistants en France en 2007.

Le constat que l'on peut faire à partir de ces données, certes partielles, est qu'il semble difficile d'imaginer une réduction substantielle supplémentaire des traitements herbicides sans risquer immédiatement de trop fortes irrégularités de contrôle voire des échecs favorisant la sélection rapide de plantes résistantes. De plus, toute nouvelle réduction conduirait à des réductions d'efficacités qui inciteraient l'agriculteur à faire un traitement supplémentaire pour ne pas perdre le contrôle de la situation. D'autre part, la recherche systématique de réduction de l'application d'herbicides risquerait de conduire les agriculteurs qui ne traitent déjà plus qu'une fois dans l'impasse du rejet aléatoire du dernier traitement herbicide restant. Une telle réduction ne serait possible que dans le cadre d'une réflexion globale sur le désherbage dans le système de culture en intégrant l'ensemble des pratiques possibles pour maintenir les populations d'adventices à des seuils de densité acceptables.

L'exigence de réduction de l'usage des herbicides sur tout le territoire est actuellement fondée sur le niveau de pollution des eaux superficielles et souterraines. La dernière synthèse de l'IFEN pour 2005 fait le point sur les stations de surface dont l'eau serait déclassée, ce déclassé étant lié à une analyse au moins de la station où une molécule herbicide est présente au-delà de 2 µg. Sur les dix molécules à l'origine des déclassements, seuls l'isoproturon et le chlortoluron, homologués en blés d'hiver étaient présents dans 0.9% et 0.5% des stations. Dans les eaux souterraines, aucune des dix molécules à l'origine des déclassements n'est autorisée en blés d'hiver (ifen.fr). Plus récemment, pour la campagne 2006-2007 de la DIREN de Bourgogne, on trouve aussi ponctuellement l'isoproturon et le chlortoluron en eaux superficielles, mais, encore une fois, ces molécules sont absentes des eaux souterraines (diren.bourgogne.ecologie.gouv.fr). Ainsi, dans ces deux synthèses, aucune des molécules les plus utilisées en blé (sulfonylurées) ne figure dans les tableaux des molécules quantifiées (détectées au moins une fois à des doses inférieures au seuil). Il semblerait alors que, à l'exclusion de l'isoproturon et du chlortoluron dont l'usage est en régression, les herbicides retrouvés dans les eaux ne

concernent pas la culture majeure et sont soit des produits d'usage très général ou spécifiques d'autres cultures, soit des molécules désormais interdites.

Les agriculteurs ont entrepris de réels efforts depuis quelques années en réduisant les quantités épandues. Dans l'absolu il est important de réduire encore l'usage de pesticides. Mais, parce que la situation du contrôle chimique des adventices est très compromise (peu de nouveaux herbicides, manque de diversité de modes d'action, développement de résistances aux produits restants), il faut absolument continuer à rechercher des adaptations des systèmes de culture. Ainsi, des essais longue durée de systèmes montrent que la gestion des adventices est possible avec très peu, voire pas de contrôle chimique, mais le bénéfice environnemental (et même souvent le bénéfice économique) n'est pas nécessairement amélioré (voire dégradé) (plus de passages, plus d'énergie fossile utilisée avec un bilan CO<sub>2</sub> détérioré, nécessité de rattrapage dans les intercultures....) (Munier-Jolain *et al.*, 2008).

Or, si la culture du blé sans herbicide est possible comme le démontrent chaque année, avec bien d'autres contraintes acceptées, les agriculteurs sous cahier des charges « agriculture biologique » (environ 29 000 ha en 2006-2007), les rendements atteints sont plus faibles (environ 30 q/ha). De plus, ils sont soumis à de fortes variations (seulement 22 q/ha en moyenne en 2007 et 19 q/ha en moyenne en 2008 – source ONIGC). Sous réserve que cette production reste rémunératrice, la part de l'agriculture biologique pourrait augmenter jusqu'à 6% des surfaces totales, plutôt en zones contraintes par le climat ou le sol, sans affecter le volume global de blé produit. Toutefois, la suppression massive et généralisée d'herbicides paraît être un pari très risqué avec les techniques agronomiques actuelles. C'est aussi la conclusion à laquelle sont arrivés les Danois du comité Bichel quant à la part de l'agriculture biologique à fixer dans leur pays (agriculture-environnement.fr). L'augmentation prévisible du coût de l'énergie et le calcul de bilan carbone devraient en outre maintenir l'intérêt de l'usage des herbicides dans les processus de production, les moyens mécaniques de contrôle, labour, binage, faux semis impactant négativement le bilan énergétique de la culture.

Par ailleurs, pour des raisons aussi bien environnementales qu'économiques, beaucoup d'agriculteurs privilégient des systèmes au travail du sol très réduit voire nul, choix soutenu à la fois par les services compétents du MEDDAT pour limiter l'érosion des sols et la DG Environnement de la Commission Européenne. Leur gestion des adventices est alors de fait fondée sur un recours exclusif aux herbicides notamment dans l'interculture pour détruire les levées abondantes issues des graines restées en surface. Pour ces agriculteurs-là, une communication visant à limiter le travail du sol et bannir les herbicides, les deux principaux leviers de la gestion des adventices, illustre bien le paradoxe d'orientations qui considèrent chaque facette de la production agricole successivement sans tenir compte des répercussions d'une contrainte sur les autres pratiques (par exemple, l'état final du parasitisme des cultures).

L'approche systémique que nous privilégions conduit également à considérer les impacts indirects du maintien d'une quantité significative d'adventices dans les cultures indépendamment de la concurrence avec la plante cultivée ou de l'augmentation du stock semencier du sol. Si les adventices au sein d'une parcelle constituent un premier maillon permettant d'assurer une diversité d'espèces plus importante au sein de l'espace agricole, une partie de ces espèces sont constituées de bio-agresseurs des cultures qui imposeront des traitements fongicides ou insecticides supplémentaires. Le rôle de relais de graminées adventices pour la contamination du blé par l'ergot du seigle (*Claviceps purpurea*) est un exemple parmi d'autres des impacts négatifs de la flore adventice au sein de la parcelle (Délès *et al.*, 2007). A l'opposé, elles peuvent servir directement de relais à des auxiliaires ou indirectement en hébergeant des ravageurs qui attireront les auxiliaires (REF ITB)

Si la réduction raisonnable de l'usage de pesticides doit être une priorité, elle devra donc se réaliser par des adaptations des systèmes de culture, faisant appel notamment à des rotations plus longues et optimisées et non pas par le rejet irréfléchi de la pratique des traitements herbicides. Le maintien de la possibilité de gérer en partie chimiquement la flore adventice associée à une meilleure organisation du

paysage, une utilisation intégrée de différentes pratiques tout en assurant des objectifs de rendement adaptés au marché et aux besoins des populations doit constituer un objectif majeur de recherche pour les agronomes.

**Remerciements :** les auteurs tiennent à remercier les agents de la Protection des Végétaux et des FREDON qui ont réalisé les relevés de flore sur le dispositif Biovigilance ainsi que les agriculteurs qui participent à ce réseau. Ce travail a bénéficié des supports financiers du Ministère de l'Agriculture, de l'ANR (en particulier programme Vigweed) et de l'INRA

### Références bibliographiques

- agriculture-environnement.fr : <http://www.agriculture-environnement.fr/spip.php?article440> Agriculture bio : des rendements en chute de 23 % pour la saison 2007/2008 !
- agriculture-environnement.fr : <http://www.agriculture-environnement.fr/spip.php?article345> : Le grand silence des écologistes sur le modèles danois
- Delos M., Eychenne N., Croin V., Cariou L., 2007. Analyse des interactions entre la flore adventice des parcelles cultivées et les autres bioagresseurs de la culture. *AFPP – vingtième conférence du COLUMA journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes DIJON 11 et 12 décembre 2007* p410-416
- Delos M., Hervieu F., Folcher L., Micoud A., Eychenne N., 2006. La «Biovigilance», des OGM au général. Exemple du suivi des grandes cultures en France. *Phytoma-LDV* 589, 44-48.
- bourgogne.ecologie.gouv.fr: [http://www.bourgogne.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf\\_Bilan\\_regional\\_07b.pdf](http://www.bourgogne.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf_Bilan_regional_07b.pdf)  
Réseau de suivi des pesticides dans les eaux en région Bourgogne
- Fried G., 2007. Variations spatiale et temporelle des communautés adventices des cultures annuelles en France. Thèse de doctorat. INRA-Université de Bourgogne, Dijon, France, 357 p.
- Fried G., Reboud X., Gasquez, J., Délos, M., 2007. Réseau Biovigilance Flore en grandes cultures. *Phytoma-LDV* 610, 10-16.
- Fried G., Chauvel B., Reboud X., 2008. Evolution de la flore adventice des champs cultivés au cours des dernières décennies : vers la sélection de groupes d'espèces répondant aux systèmes de culture. *Innovations Agronomiques* 3, 15-26.
- Gasquez J. Bay G., Boucansaud K., 2007. Mise au point sur des graminées adventices d'un test biologique spécifique des inhibiteurs de l'ALS *AFPP – vingtième conférence du COLUMA journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes DIJON 11 et 12 décembre 2007* p185-194
- Heap I.. 2008. <http://www.weedscience.org/In.asp>
- ifen.fr : [http://www.ifen.fr/uploads/media/dossier09\\_02.pdf](http://www.ifen.fr/uploads/media/dossier09_02.pdf)
- inra.fr : [http://www.inra.fr/l\\_institut/expertise/expertises\\_realisees/pesticides\\_agriculture\\_et\\_environnement](http://www.inra.fr/l_institut/expertise/expertises_realisees/pesticides_agriculture_et_environnement)
- legrenelle-environnement.fr : <http://www.legrenelle-environnement.fr/grenelle-environnement/>
- agriculture.gouv.fr : <http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/phyto-2018-plan-pour>
- Munier-Jolain N., Deytieux V., Guillemin J.P., Granger S., Gaba S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innovations Agronomiques* 3, 75-88.
- Oerke E.C., 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144, 31-43
- uipp.org : <http://www.uipp.org/repere/chiffre.php>

## Détection de résistances aux inhibiteurs de l'ALS : des outils moléculaires pour un diagnostic rapide et fiable.

C. Délye<sup>1</sup>, K. Boucansaud<sup>1</sup>, F. Pernin<sup>1</sup>, B. Couloume<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: INRA, UMR 1210 Biologie et Gestion des Adventices, 17 rue Sully, 21000 Dijon

<sup>2</sup>: Bayer CropScience, 16 rue Jean-Marie Leclair, 69009 Lyon.

Correspondance : delye@dijon.inra.fr;

### Résumé

Les inhibiteurs de l'acétolactate-synthase (ALS) sont une des classes d'herbicides les plus utilisées actuellement. Être capable de diagnostiquer rapidement la présence de plantes résistantes à ces substances contribue à maintenir leur efficacité. La plupart des cas de résistance aux inhibiteurs de l'ALS sont dus à des mutations dans le gène de l'ALS. Des tests moléculaires ont été développés chez les principales graminées adventices du blé, le Vulpin (*Alopecurus myosuroides*) et les Ivraies (*Lolium* spp.). Ces tests permettent de détecter en 48 heures après l'arrivée des échantillons au laboratoire n'importe quelle mutation dans l'ALS dont on sait qu'elle confère une résistance. Les tests ont servi à analyser des échantillons d'Ivraies et de Vulpin provenant de parcelles où des échecs de contrôle de ces adventices par des inhibiteurs de l'ALS ont été observés. Ils ont révélé la présence de mutations de l'ALS en fréquences élevées dans 9 des 22 échantillons analysés. La résistance liée à l'ALS semble pouvoir évoluer rapidement dans certains cas, notamment quand le programme de désherbage est basé essentiellement sur des inhibiteurs de l'ALS anti-graminées. Ceci souligne la nécessité de raisonner l'emploi de ces molécules et de les inclure dans un ensemble diversifié de pratiques culturales.

### Abstract

Acetolactate-synthase (ALS) inhibitors are currently one of the most broadly used classes of herbicides. Rapid resistance diagnosis can help safeguarding their efficacy. Most cases of resistance to ALS-inhibiting herbicides are due to mutations in the gene encoding ALS. DNA-based assays were developed to detect any ALS mutation endowing resistance in black-grass (*Alopecurus myosuroides*) and ryegrasses (*Lolium* spp.), two major grass weeds in wheat crops. These tests enable resistance diagnosis within 48 hours. They were used to analyse black-grass and ryegrass samples collected in fields where ALS inhibitor applications failed to control these weeds. The tests detected high frequencies of ALS mutations in 9 out of the 22 samples analysed. ALS-based resistance can evolve rapidly in some cases, particularly when herbicide spraying programs are mostly based upon ALS inhibitors targeting grass weeds. This underlines the need to ponder ALS inhibitor applications, and to use them in association with a diversity of cultural practices as high as possible.

---

### Introduction

Les herbicides sont une des clefs de l'intensification de l'agriculture, qui a permis de garantir une certaine sécurité alimentaire en Europe. Leur emploi a cependant entraîné une diminution de la biodiversité dans les agro-écosystèmes en contribuant à éliminer les espèces les plus fragiles et s'est traduit par la présence de résidus dans l'environnement. La nécessité d'un changement profond des pratiques culturales a été reconnue lors du « Grenelle de l'Environnement ». L'une des principales

mesures envisagées est la réduction de moitié de l'usage des produits phytosanitaires d'ici 2018 (Plan Écophyto 2018). De plus, la directive européenne 91/414/CE a provoqué le retrait de nombreuses substances. De ce fait, la gamme des solutions herbicides disponibles pour l'agriculteur risque d'être de plus en plus restreinte (Decoin, 2008). Enfin, les contraintes économiques conduisent les agriculteurs à réduire le nombre d'applications. Une réponse aux nouveaux critères légaux et aux contraintes économiques pourrait être l'augmentation dans les programmes de traitements de la part des herbicides combinant forte efficacité, faible dose d'emploi, et large spectre d'action. Les substances actuellement disponibles répondant à ces critères sont essentiellement les inhibiteurs de l'acétolactate-synthase (ALS), et notamment les sulfonilurées qui sont appliquées à des doses allant de quelques grammes à quelques dizaines de grammes à l'hectare. Ainsi, sur blé, la tendance actuelle est d'employer majoritairement des herbicides inhibiteurs de l'ALS, et particulièrement l'association de deux sulfonilurées, le mésosulfuron et l'iodosulfuron (Gasquez *et al.*, 2008). Cependant, l'application fréquente de substances ne représentant qu'un nombre limité de modes d'action pour contrôler les adventices favorise inéluctablement le développement de résistances. Ces résistances peuvent drastiquement réduire, voire annuler, l'efficacité des applications d'herbicides. Or, les inhibiteurs de l'ALS sont la famille d'herbicides pour laquelle le plus de cas de résistance ont été signalés dans le monde (Heap, 2008). L'existence de résistances a été très récemment démontrée en France chez deux graminées adventices des céréales d'hiver ayant un fort impact économique, le Vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Huds.) et les Ivraies (*Lolium* spp.) (Délye et Boucansaud, 2008 ; Délye *et al.*, sous presse ; Gasquez *et al.*, 2007)

Les herbicides ont toutes les chances de rester encore longtemps une garantie d'une production agricole suffisante et de qualité (Di Tullio *et al.*, 2007). Peu de nouvelles substances et aucun nouveau mode d'action ne semblent devoir être mis sur le marché dans un futur proche. Il est donc indispensable de préserver le plus longtemps possible l'efficacité des substances disponibles, notamment des inhibiteurs de l'ALS, et de rationaliser au mieux leur emploi (un minimum d'applications pour un maximum d'efficacité). Une façon d'y contribuer est de développer des outils et des méthodologies permettant un diagnostic rapide et précoce de la résistance.

### **La résistance aux inhibiteurs de l'ALS : bases génétiques**

Il existe deux grands types de mécanismes de résistance aux pesticides en général, et aux herbicides en particulier. Le premier est la résistance liée à la cible, qui est due à des mutations dans le gène codant pour la protéine cible de l'herbicide. Les herbicides se fixent sur une région donnée de leur protéine cible : le site d'action. La forme spatiale de ce site d'action sur la protéine codée par le gène mutant est légèrement différente de celle du site d'action sur la protéine non mutante, ce qui entrave la fixation des herbicides et permet la survie de la plante. Le second type de mécanisme de résistance est la résistance non liée à la cible. Elle englobe des processus différents, mais qui ont en commun de réduire la quantité de molécules herbicides atteignant sa cible dans une proportion telle que la survie de la plante en est peu ou pas affectée : pénétration réduite de l'herbicide dans la plante, déplacement réduit de l'herbicide vers sa cible, piégeage de l'herbicide ou dégradation de celui-ci. Les niveaux de résistance dus aux deux types de mécanismes varient avec la substance herbicide et l'espèce. Ainsi, selon les cas, une résistance liée à la cible peut permettre à la plante de survivre à seulement deux ou trois fois la dose homologuée d'herbicide (Délye *et al.* 2004), ou à plusieurs centaines de fois cette dose (Délye *et al.*, 2005).

L'essentiel de la résistance aux inhibiteurs de l'ALS semble dû à des mutations ponctuelles dans le gène de l'ALS. Des études conduites sur plus de 30 espèces d'adventices ont bien caractérisé ces mutations (Tranel *et al.*, 2008). Cinq positions dans le gène de l'ALS, toujours les mêmes, sont impliquées dans la résistance (Tableau 1). Toute mutation se produisant à une de ces positions dans

l'ALS d'une plante rend cette plante résistante à des inhibiteurs de l'ALS (mais pas forcément à tous, cf. Tableau 1).

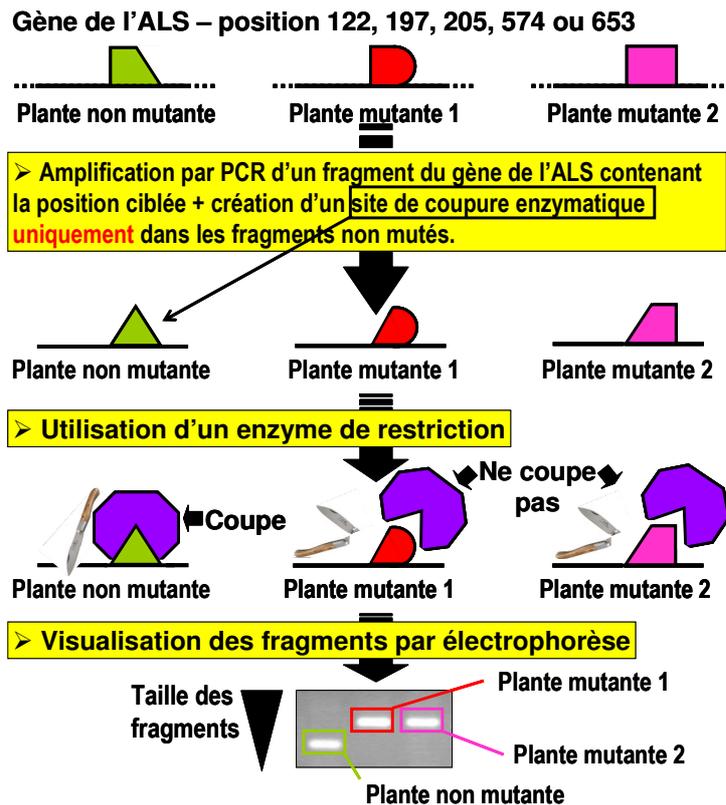
**Tableau 1** : Profils de résistance croisée associés aux mutations connues dans le gène de l'ALS (d'après Tranel *et al.*, 2008). R, résistance ; S, sensibilité, PDD, pas de données. **Attention : ces données sont une synthèse de la littérature. Une caractéristique de la plupart des travaux publiés est de ne considérer qu'une mutation particulière, dans une espèce donnée, et une ou deux substances actives représentant une ou deux familles chimiques. L'existence d'exceptions aux profils ci-dessous est donc possible.**

Position de l'ALS		Familles d'inhibiteurs de l'ALS autorisées sur blé en France		
Numéro	Nombre de mutants résistants connus	Sulfonylurées	Triazolopyrimidines	Sulfonylamino-carbonyl-triazolinones
122	1	R	S	PDD
197	8	R	R	R
205	1	R	R	PDD
574	1	R	R	R
653	2	S	S	PDD

### Les « tests ADN » de diagnostic de la résistance : comment ça marche ?

Un test ADN de diagnostic permet d'identifier une ou des mutations d'intérêt dans le génome d'un individu. Dans le cas présent, le but est d'identifier des plantes portant une ou des mutations dans le gène de l'ALS. La démarche habituelle dans ce cas est d'attendre qu'un problème de résistance se déclare au champ, de collecter des plantes ou des semences, de vérifier par des tests biologiques que certaines plantes sont en effet résistantes, de séquencer l'ALS de ces plantes pour identifier la ou les mutations en cause, et de développer un test de diagnostic ciblant la ou les mutations identifiées (en général un test par mutation). Cette démarche doit être effectuée de nouveau quand une mutation non détectée par les tests développés est sélectionnée au champ. La procédure « classique » est donc longue, et nécessite de développer autant de tests de diagnostic qu'il existe de mutations. Dans le cas de la résistance aux inhibiteurs de l'ALS, ceci impliquerait de développer pas moins de 13 tests (Tableau 1) ! L'approche choisie a donc été différente. Nous avons utilisé une technique dérivée de la PCR, appelée technique dCAPS (derived Cleaved Amplified Polymorphic Sequence). Cette technique permet de détecter à l'aide d'un **seul** test **toutes** les mutations possibles à une position donnée de l'ALS (Figure 1).

Cinq tests dCAPS (un par position) permettant de diagnostiquer une résistance ont été développés pour le Vulpin, et cinq autres pour les Ivraies.



**Figure 1 :** Principe du test dCAPS de diagnostic des mutations de l'ALS (d'après Délye et Boucansaud, 2008). Le diagnostic se fait par digestion enzymatique du fragment d'ALS amplifié par PCR. L'enzyme de restriction coupe ce fragment uniquement s'il contient la version non mutante (« sensible ») de la position. Si une mutation, quelle qu'elle soit, est présente à la position étudiée, le fragment amplifié par PCR n'est pas coupé. La différence de taille observée après électrophorèse permet donc de déterminer si la plante analysée est ou non mutante à la position considérée. En cas de détection d'une mutation, la position à laquelle cette mutation a été détectée renseigne sur les substances auxquelles la plante mutante est *a priori* résistante (Tableau 1).

## Recherche de résistances dans des échantillons de semences de Vulpin et d'Ivraies provenant de quelques parcelles « à problèmes »

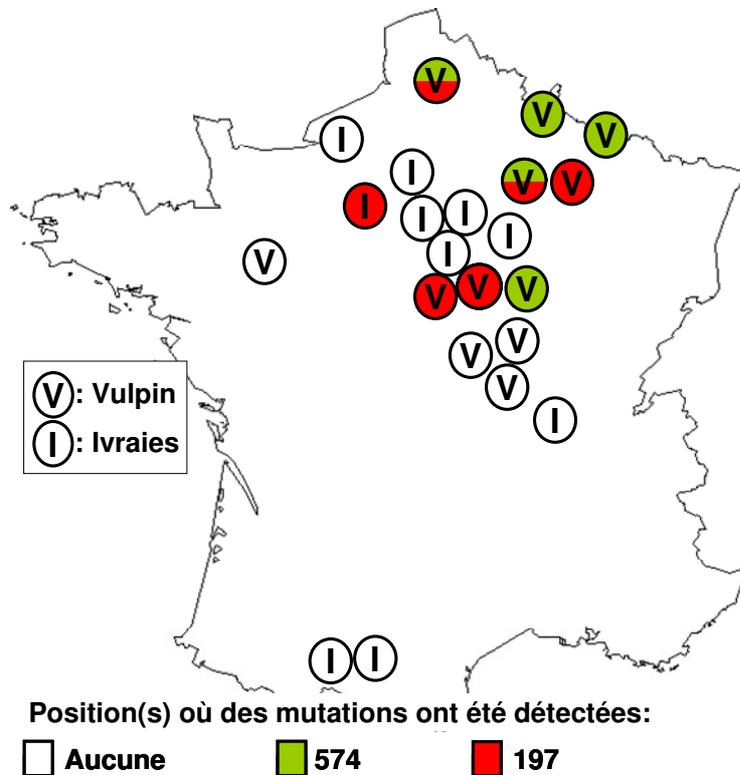
Les tests dCAPS ont été utilisés pour analyser 10 échantillons de semences d'Ivraies et 12 de Vulpin provenant de parcelles où des problèmes de contrôle de ces adventices par des inhibiteurs de l'ALS ont été rencontrés en 2006 ou en 2007 (Tableau 2). Pour chaque échantillon, 50 plantules ont été analysées à l'aide de chacun des cinq tests dCAPS (illustration sur la Figure 2). En parallèle, la présence de plantes résistantes a été recherchée dans chaque échantillon par l'application de la formulation Atlantis® WG (3 % iodosulfuron + 0,6 % mésosulfuron, Bayer CropScience) sur 50 plantules au stade 3-4 feuilles cultivées en serre froide.

### *Tests dCAPS et applications d'herbicides confirment la présence de plantes résistantes dans 9 parcelles.*

Des plantes contenant des mutations dans le gène de l'ALS ont été identifiées par les tests dCAPS dans un des échantillons d'Ivraie et dans huit des échantillons de Vulpin (Figure 2). Dans ces neuf échantillons, de 25 à 100% des plantes contiennent des mutations dans l'ALS (Tableau 2). Les mutations détectées ne concernent que deux positions : 197 et 574. Dans deux des échantillons de Vulpin, nous avons détecté la présence simultanée de mutations à ces deux positions (197 et 574), y compris dans une même plante.

Les résultats des tests dCAPS sont corroborés par ceux des applications d'herbicides (Tableau 2), qui confirment l'existence de plantes résistantes dans l'ensemble des neuf échantillons. Le problème de contrôle du Vulpin ou des Ivraies observé dans les neuf parcelles correspondantes est donc clairement lié à la présence de plantes mutantes résistantes en fréquences élevées. En effet, même si des différences de sensibilité peuvent exister selon la substance active, l'espèce considérée et la mutation,

la plupart des travaux publiés montrent que les mutations aux positions 197 et 574 confèrent toutes deux une résistance aux trois familles d'inhibiteurs de l'ALS autorisés sur blé en France (Tableau 1).



**Figure 2 :** Origine géographique des 12 échantillons de Vulpin et des 10 d'Ivraies, et diagnostic de la présence de plantes contenant des mutations de l'ALS.

#### *Peu ou pas de plantes résistantes détectées dans les 13 autres parcelles*

En revanche, aucune plante mutante n'a été détectée par les tests dCAPS dans les neuf autres échantillons d'Ivraies, ni dans les quatre autres échantillons de Vulpin (Figure 2). Ces résultats sont confirmés par les applications d'herbicides, qui révèlent que ces échantillons contiennent très peu ou pas du tout de plantes résistantes (Tableau 2). Le problème de contrôle du Vulpin ou des Ivraies observé sur les parcelles correspondantes pourrait donc essentiellement être dû à une mauvaise application des herbicides. Quelques plantes résistantes ont toutefois été mises en évidence par les applications d'herbicides. Il est possible qu'elles possèdent une résistance non liée à l'ALS. Ce type de résistance ne peut être détecté à l'aide des tests dCAPS.

La résistance non liée à l'ALS est le plus souvent due à une métabolisation exacerbée d'herbicides ; elle est aussi appelée « détoxication ». La métabolisation exacerbée d'herbicides est très répandue chez le Vulpin dans le cas de la résistance aux « fops » (inhibiteurs de l'acétyl-coenzyme A carboxylase ; exemples : fénoxaprop [Puma LS®], clodinafop [Célio®]) (Délye *et al.*, 2006). Elle a été mise en évidence dans certains cas de résistance aux inhibiteurs de l'ALS chez le Vulpin (Letouzé et Gasquez, 2001) comme chez les Ivraies (Christopher *et al.*, 1991; 1992). Toutefois, son importance dans la résistance aux inhibiteurs de l'ALS en France reste à évaluer chez le Vulpin comme chez les Ivraies.

**Tableau 2 :** Échantillons de Vulpin et d'Ivraie étudiés. Les numéros d'échantillons sont les mêmes que sur la Figure 2. Suite à l'application d'herbicides, les échantillons ont été répartis en trois classes : moins de 20% de plantes résistantes, de 21 à 50 % de plantes survivantes, et plus de 50% de plantes survivantes.

Échantillon	Nombre d'applications d'inhibiteurs de l'ALS sur :		% de plantes mutantes (test dCAPS)	% de plantes résistantes (traitement herbicide)
	la dernière campagne	les 4 dernières campagnes		
<b>Vulpin</b>				
V1	1	4	100%	> 50%
V2	2	5	100%	Non testé
V3	2	4	85%	> 50%
V4	2	3	43%	> 50%
V5	3	6	100%	> 50%
V6	2	5	95%	Non testé
V7	1	5	38%	> 50%
V8	1	3	0%	< 20%
V9	1	5	0%	< 20%
V10	1	1	0%	< 20%
V11	1	3	0%	< 20%
V12	2	5	100%	> 50%
<b>Ivraies</b>				
I1	2	5	0%	< 20%
I2	1	2	0%	< 20%
I3	2	4	75%	> 50%
I4	1	2	0%	< 20%
I5	1	3	0%	Non testé
I6	1	1	0%	< 20%
I7	1	1	0%	< 20%
I8	1	1	0%	< 20%
I9	1	2	0%	< 20%
I10	1	2	0%	< 20%

### Sans précautions, la résistance peut évoluer rapidement

Le résultat le plus frappant de ce travail est probablement la détection de plantes mutantes en fréquences très élevées dans certains échantillons. On observe en effet la présence de jusqu'à 100% de plantes mutantes sur des parcelles n'ayant reçu des inhibiteurs de l'ALS anti-graminées que pendant 4 ans (5 à 6 applications, Tableau 2). Ces parcelles étaient pour la plupart conduites en monoculture de blé, et désherbées quasi-exclusivement à l'aide d'inhibiteurs de l'ALS anti-graminées. Ceci suggère que, si l'on ne prend pas de précautions dans l'utilisation de ces herbicides, la sélection de plantes résistantes peut être très rapide.

### Avantages et inconvénients des tests dCAPS

Les tests moléculaires de détection de résistances qui avaient été mis au point avant ce travail étaient très spécifiques. Chacun ne permettait de détecter qu'une seule mutation à une position donnée (Délye et al., 2002). Les tests dCAPS présentés ici, basés sur une technologie légèrement différente,

permettent de détecter toutes les mutations possibles à une position donnée. Ceci est un gros avantage pour les positions où plusieurs mutations peuvent exister, et particulièrement la position 197 pour laquelle huit mutations sont connues. Le test dCAPS possède d'autres atouts :

- **Souplesse** vis-à-vis du matériel végétal analysé : le diagnostic peut être effectué à partir de petits fragments de feuilles récoltés sur le terrain, conservés « à sec » entre deux feuilles de papier, et voyageant par la poste. Il n'est pas nécessaire de disposer de matériel vivant.
- **Rapidité** : le temps requis entre la réception de l'échantillon et la lecture du diagnostic est de l'ordre de 48 heures. Ceci permet de savoir très rapidement si des mutations de l'ALS sont présentes sur une parcelle. Sous réserve de mettre au point un protocole d'échantillonnage adapté, il est donc possible d'avoir un diagnostic avant d'effectuer le traitement.
- « **Portabilité** » : les tests développés sont spécifiques d'une espèce, mais pas la méthodologie utilisée. Il est donc assez aisé de développer des tests dCAPS pour le diagnostic des mutations de l'ALS chez d'autres espèces d'adventices.
- **Possibilité de réutiliser les échantillons** pour d'autres tests moléculaires. Ainsi, des mutations conférant une résistance à des « fops » ont été identifiées par d'autres tests moléculaires (Délye *et al.*, 2002) dans 32% des plantes de l'échantillon de Vulpin V12. 100% des plantes de cet échantillon contiennent une mutation de l'ALS (Tableau 2), ce qui signifie que 32% des plantes de cet échantillon sont résistantes aux inhibiteurs de l'ALS **et** aux « fops ».

Malgré leurs avantages indéniables, les tests dCAPS possèdent quelques gros inconvénients. Le premier est bien sûr la nécessité de disposer d'un équipement de biologie moléculaire. En outre, les tests dCAPS ont l'inconvénient d'être spécifiques d'un type de résistance. Si les cinq tests permettent de détecter dans une espèce d'adventices toutes les résistances actuellement connues qui sont dues à des mutations de l'ALS, ils ne permettent de détecter aucun autre mécanisme de résistance. Ceci est bien illustré par l'existence de quelques plantes résistantes en tests biologiques dans des échantillons de Vulpin ou d'Ivraies où aucune mutation de l'ALS n'a été détectée (Tableau 2). De ce fait, les tests dCAPS sont idéaux pour fournir un premier diagnostic, très rapide, de la résistance. Ce diagnostic doit ensuite idéalement être complété par des tests biologiques de sensibilité aux herbicides pour être complet.

### Pour conclure :

Les tests dCAPS ont permis d'effectuer un diagnostic rapide de la résistance due à des mutations dans l'ALS dans les échantillons d'Ivraies et de Vulpin analysés. À l'issue de cette étude, deux points saillants émergent :

- Les tests dCAPS ont permis de confirmer la présence de plantes résistantes à cause de mutations dans le gène de l'ALS dans neuf des 22 parcelles étudiées. Les mutations identifiées dans les échantillons analysés ne l'ont été qu'à deux positions : 197 et 574. Ceci est cohérent avec les données de la littérature, où des mutations à ces positions sont de loin les plus fréquemment observées (Tranel *et al.*, 2008). Les positions 197 et 574 sont également actuellement les seules dont l'implication dans la résistance aux inhibiteurs de l'ALS ait été montrée chez des graminées adventices. Les mutations à ces deux positions semblent toutes conférer une résistance aux trois familles d'inhibiteurs de l'ALS utilisés sur blé (Tableau 1). De ce fait, une rotation efficace des substances actives pour prévenir la résistance doit considérer **des modes d'action différents**, et pas seulement des familles chimiques différentes mais ayant un même mode d'action. À cet égard, la liste des

substances inhibitrices de l'ALS utilisables sur céréales en France est rappelée dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Substances actives et formulations correspondant aux différentes familles d'inhibiteurs de l'ALS autorisées sur blé en France en 2008.

	Familles d'inhibiteurs de l'ALS autorisées sur blé en France		
	Sulfonylurées	Triazolopyrimidines	Sulfonylamino-carbonyl-triazolinones
Substances actives	Amidosulfuron, flupyrsulfuron, iodosulfuron, mésosulfuron, metsulfuron, sulfosulfuron, thifensulfuron, tribenuron	Florasulam	Propoxycarbazone-sodium
Exemples de produits formulés (substances actives)	Archipel (mésosulfuron + iodosulfuron), Allié (metsulfuron)	Primus	Attribut

- Les tests ADN ont indirectement permis de montrer que des programmes de désherbage basés exclusivement ou essentiellement sur des inhibiteurs de l'ALS peuvent, dans certains cas, aboutir rapidement à l'obtention de fréquences élevées de plantes mutantes (Tableau 2). La monoculture de blé est probablement un facteur facilitant la sélection de plantes résistantes dans les espèces de graminées adventices comme le Vulpin ou les Ivraies.

Pour finir, il faut souligner que les cas étudiés ici ne sont certainement pas représentatifs de la situation générale en France : les échantillons analysés proviennent tous de parcelles où des problèmes de contrôle ont été signalés. Ils ont néanmoins valeur d'avertissement, en soulignant la nécessité de bien raisonner l'emploi des inhibiteurs de l'ALS dans leur ensemble, et de les inclure dans un ensemble diversifié de pratiques culturales.

### Références bibliographiques

Christopher J.T., Powles S.B., Holtum J.A.M., 1992. Resistance to acetolactate synthase-inhibiting herbicides in annual ryegrass (*Lolium rigidum*) involves at least two mechanisms. *Plant Physiology* 100, 1909-1913.

Christopher J.T., Powles S.B., Liljegren D.R., Holtum J.A.M., 1991. Cross-resistance to herbicides in annual ryegrass (*Lolium rigidum*). II. Chlorsulfuron resistance involves a wheat-like detoxification system. *Plant Physiology* 95, 1036-1043.

Decoin M., 2008. Réglementation demain, ce qui se prépare en France. *Phytoma LdV* 616, 21-25.

Délye C., Boucansaud K., 2008. A molecular assay for the proactive detection of target site-based resistance to herbicides inhibiting acetolactate synthase in *Alopecurus myosuroides*. *Weed Research* 48, 97-101.

Délye C., Boucansaud K., Pernin F., Le Corre V., sous presse. Variation at the gene encoding acetolactate-synthase in ryegrasses (*Lolium* spp.) and proactive detection of mutant, herbicide-resistant alleles. *Weed Research*.

Délye C., Chauvel B., Guillemain J-P., Menchari Y., Matějček A., Michel S., Camilleri C., Bérard A., Brunel D., Dessaint F., 2006. La résistance du Vulpin des champs aux anti-graminées dans les blés en France – La métabolisation : son importance crée une situation à risque. *Phytoma – LdV* 598, 12-16.

Délye C., Matějček A., Calmès É, Chauvel B., 2002. Résistances aux herbicides chez le Vulpin et le Ray-grass: des marqueurs moléculaires pour un diagnostic rapide. *Phytoma* – LdV 548, 41-46.

Délye C., Menchari Y., Michel S., Darmency H., 2004. Molecular bases for sensitivity to tubulin-binding herbicides in green foxtail. *Plant Physiology* 136, 3920-3932.

Délye C., Zhang X.-Q., Michel S., Matějček A., Powles S.B., 2005. Molecular bases for sensitivity to acetyl-coenzyme A carboxylase inhibitors in black-grass. *Plant Physiology* 137, 794-806.

Di Tullio E., Baldi S., Bono P., Culver J., Filippini R., Gentile E., Magnatti P., Pipia D., Spigola M., Zaghi A., 2007. L'agriculture européenne du futur : le rôle des produits phytosanitaires. Institut Nomisma, Bologne. Sur demande à [agri-food@nomisma.it](mailto:agri-food@nomisma.it), ou auprès des auteurs.

Gasquez J., Fried G., Délos M., Gauvrit C., Reboud X., 2008. Vers un usage raisonné des herbicides : analyse des pratiques en blé d'hiver de 2004 à 2006. *Innovations Agronomiques* 3, 145-156.

Gasquez J., Bay G., Boucansaud K., 2007. Mise au point sur des graminées adventices d'un test biologique spécifique des inhibiteurs de l'ALS. Vingtième conférence du COLUMA - Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, 185-194, AFPP, Paris.

Heap I.M., 2008. Herbicide resistant weeds. <http://www.weedresearch.com>

Letouzé A., Gasquez J., 2001. Inheritance of fenoxaprop-P-ethyl resistance in a blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) population. *Theoretical and Applied Genetics* 103, 288-296.

Tranel P.J., Wright T.R., Heap I.M., 2008. Mutations from herbicide-resistant weeds. <http://www.weedscience.com>

## **L'identification des adventices assistée par ordinateur avec le système IDAO**

**T. Le Bourgeois<sup>1</sup>, P. Bonnet<sup>1</sup>, C. Edelin<sup>2,3</sup>, P. Grard<sup>4</sup>, J. Prosper<sup>4</sup>, F. Théveny<sup>1</sup>, D. Barthélémy<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> : CIRAD, UMR AMAP, Montpellier, F34000 France

<sup>2</sup> : Université Montpellier 2, UMR AMAP, Montpellier, F-34000 France

<sup>3</sup> : CNRS, UMR AMAP, Montpellier, F-34000 France

<sup>4</sup> : CIRAD, UMR AMAP, Vientiane, Laos; CIRAD, UMR AMAP, Montpellier, F-34000 France

<sup>5</sup> : INRA, UMR AMAP, Montpellier, F-34000 France

Correspondance : thomas.le\_bourgeois@cirad.fr

### **Résumé**

L'identification des adventices d'une culture est une phase primordiale pour accéder à l'information nécessaire à l'élaboration de moyens de lutte performants. Les difficultés rencontrées par les non botanistes pour réaliser cette identification avec les outils classiques comme les flores ou les manuels (trop techniques, inefficaces pour les plantules ou les spécimens incomplets, processus difficile à suivre...) nous ont amené à développer un nouveau système de reconnaissance assistée par ordinateur appelé IDAO (IDentification Assistée par Ordinateur). Ce logiciel a la particularité d'utiliser un système d'identification graphique par portrait robot qui permet à l'utilisateur de construire l'image de la plante à partir de caractères choisis librement en fonction du spécimen ou de l'utilisateur et de tolérer les erreurs d'observation ou le polymorphisme. Les espèces sont listées en permanence en fonction de leur similitude avec ce portrait robot. Descriptions, illustrations et informations (biologie, écologie, lutte...) sont accessibles à tout moment sous la forme de pages au format Html disponibles localement ou sur un site Internet, et donc régulièrement actualisables. IDAO est multilingue et multiplateformes informatique. Il peut être utilisé sur PC (installable à partir de cdrom ou téléchargeable) ou directement au champ sur ordinateur ultra mobile. Une série d'applications a déjà été développée pour des flores de différents systèmes de cultures (riz, cotonnier, vivrier, canne à sucre...) et de différentes régions du monde (Afrique, Inde, Asie, Océan Indien) ainsi que pour d'autres types de plantes (arbres, orchidées...). Le système IDAO va évoluer dans le cadre du projet PI@ntnet qui démarrera début 2009. Il sera mis à disposition sous forme de logiciel libre sur une plateforme Internet permettant ainsi à tout utilisateur de développer seul ou en partenariat une application et de la mettre à disposition de la communauté d'utilisateurs. Ce système d'identification sera associé à un outil de reconnaissance automatique par analyse d'images.

**Mots clés** : identification assistée par ordinateur, portrait robot, IDAO, adventice

### **Abstract**

Identification of crop weeds is essential to get the information needed for elaborating efficient control methods. Non specialised people had difficulties to do this identification with classical tools, such as floras or field guides (too technical, unsuitable for seedlings or partial samples, process difficult to follow...). That brought us to develop a new system for plant recognition assisted by computer that was called IDAO (IDentification Assistée par Ordinateur). This software has the distinctive feature to use a graphical identification system by identikit. This identikit allows the user to build the image of the plant from traits freely chosen according to the specimen or to the user. It tolerates observation errors or polymorphism. Species are listed by their probability of similarity with the identikit. Descriptions,

illustrations and information (biology, ecology, control...) are available at any time in local or online Html pages. These descriptive files can be regularly updated on the Web site. IDAO is a multilingual and multiplatform system. It can be used on PC (from cdrom or downloaded) or directly in the field on ultra mobile computer. Several applications have been published on weed floras of different cropping systems (rice, cotton, food crops, sugarcane...) and for different world areas (Africa, Asia, India, Indian Ocean), and also for other kinds of plants (trees, orchids...). The IDAO system will evolve during the PI@ntnet project that will start in early 2009. IDAO will be available as free software on an Internet platform, for every body can develop by himself or under collaboration new applications available for all the user community. This identification system will be linked to an automatic recognition tool, using image analysis.

**Key words:** identification assisted by computer, identikit, IDAO, weed

---

## Introduction

Les adventices des cultures sont responsables de 5% des pertes de récolte en zone tempérée et généralement de plus de 25% en zone tropicale (Le Bourgeois et Marnotte, 2002). La gestion de l'enherbement est donc une préoccupation majeure des agriculteurs. La question : « comment désherber ma parcelle ? » est généralement suivie d'une autre question : « quelles sont les adventices de la parcelle ? » Ainsi, l'accès à l'information pour l'élaboration et la mise en œuvre de moyens de lutte performants nécessite en premier lieu une identification précise des adventices. Pourtant, l'identification des adventices est souvent un exercice difficile. Les flores classiques ne permettent que rarement l'identification d'une plante à un stade jeune ou lorsqu'on ne possède qu'un bout de tige avec quelques feuilles. La terminologie botanique est généralement peu compréhensible pour les non spécialistes. Les noms vernaculaires sont souvent ambigus tandis que les noms latins sont peu connus. Une forte demande des acteurs de terrain, particulièrement en zone tropicale, nous a amené depuis les années 90 à développer un système d'identification graphique, appelé IDAO (IDentification Assistée par Ordinateur) (Grard, 1996), afin d'identifier des adventices à n'importe quel stade de développement, sans connaissance préalable en botanique. Cet outil est également un support de diffusion d'information sur les espèces et un outil de formation. La première application publiée en 1996, Adventrop, portait sur les adventices des cultures annuelles d'Afrique tropicale (Grard *et al.*, 1996). Elle fut suivie par AdvenRun en 2000 pour les adventices de la Réunion (Le Bourgeois *et al.*, 2000) ; Oscar pour les adventices des rizières de la plaine Indo-gangétique (Inde) (Grard, 2005) et Oswald pour les adventices des rizières du Laos et du Cambodge (Grard *et al.*, 2006). La dernière en date est AdventOI pour les adventices des îles du sud-ouest de l'Océan Indien (Le Bourgeois *et al.*, 2008). IDAO était initialement un logiciel sous licence propriétaire, mais évolue vers un logiciel libre et une mise à disposition des contenus et du procédé de réalisation sur une plateforme Internet.

## Le système IDAO

### *Le système d'identification*

**Le système d'identification** utilisé dans IDAO combine la construction d'un portrait robot de plante et un calcul d'indices de similarité. Il s'agit pour l'utilisateur de construire le portrait robot de l'échantillon qu'il doit identifier. Nous sommes partis du postulat que toute personne, même non botaniste, ayant collecté un échantillon de plante est capable de dire en quoi l'espèce collectée est différente des autres espèces du lieu.

L'utilisateur va donc pouvoir renseigner les caractères particuliers qu'il a pu observer sur son échantillon et qui lui permettent de différencier l'espèce. Tous les caractères utilisés sont des caractères qualitatifs disjonctés en fonction de leurs modalités. Le choix des caractères à renseigner et de leurs états se fait de manière graphique, à l'écran, à partir du portrait robot qui, au départ, symbolise une plante théorique (Figure 1). En cliquant sur le caractère à décrire (par exemple le type de feuille), une nouvelle fenêtre s'ouvre présentant les différentes modalités possibles de ce caractère (Figure 2). Il suffit de choisir la modalité correspondant à l'échantillon. Celle-ci est alors prise en compte et le portrait robot est mis à jour.

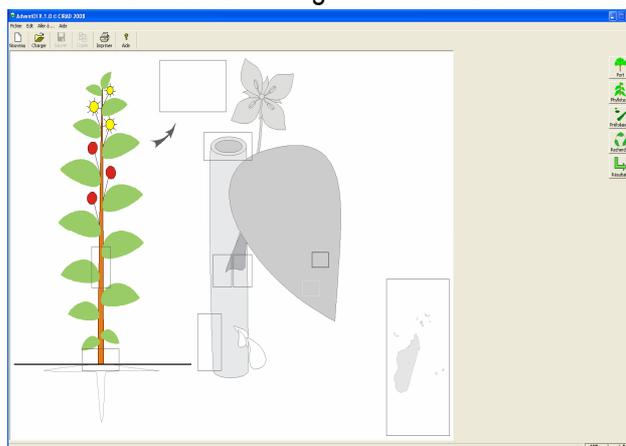
De façon à favoriser la reconnaissance au

stade végétatif, les caractères portent principalement sur des caractères morphologiques végétatifs globaux (tige, feuille, phyllotaxie...) ou de détail (forme de la marge du limbe, pilosité de la face supérieure...). Certains caractères de l'appareil reproducteur sont également utilisables (inflorescence, couleur de fleur, fruit). De même, pour des outils d'intérêt régional la répartition géographique de l'espèce peut être prise en compte dans le portrait robot. Par exemple, une plante lianescente à feuilles alternes, composées, trifoliolées, à stipules triangulaires, se traduirait par le portrait robot avancé de la Figure 3.

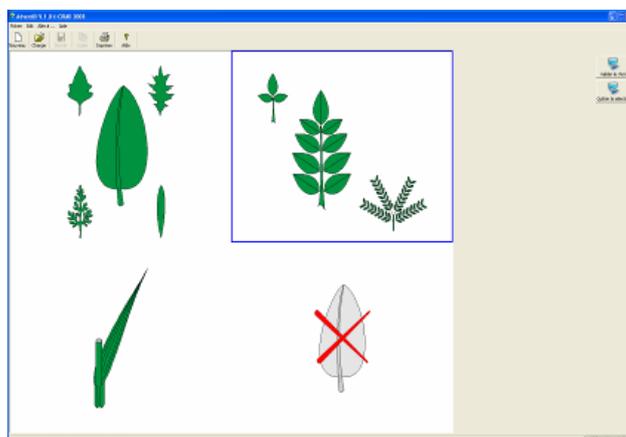
Contrairement à une flore classique hiérarchique, les caractères à renseigner peuvent être choisis dans n'importe quel ordre,

en fonction de la plante à identifier et/ou du choix de l'observateur. De plus, un caractère renseigné précédemment peut être repris et modifié ultérieurement sans pour autant modifier ou perdre les informations issues des autres caractères.

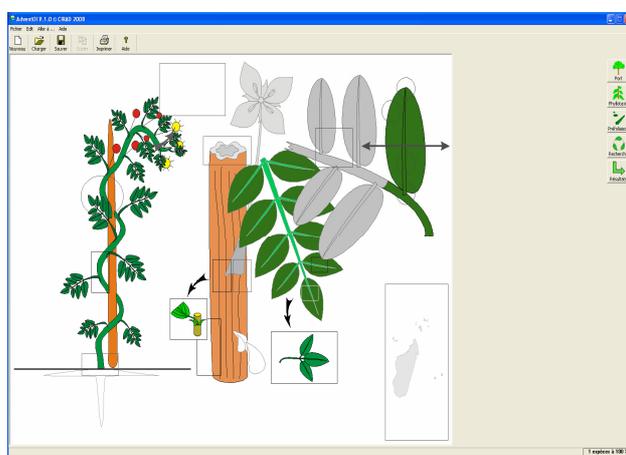
Chaque fois qu'un nouveau caractère est renseigné, le logiciel calcule l'ensemble des indices de similarité entre chacune des espèces et la description faite par l'utilisateur sur le portrait robot. Cet indice de similarité correspond au rapport entre la somme des états de caractères pondérés communs au portrait et à l'espèce considérée et la somme des états de caractères pondérés décrits dans



**Figure 1 :** Portrait robot initial présentant une plante théorique et les différents caractères qui peuvent être renseignés.

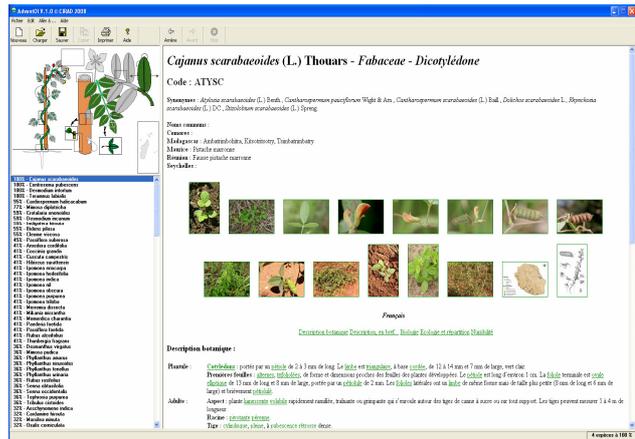


**Figure 2 :** Le caractère type de feuille présente quatre modalités (simple, composée, linéaire engainante, absente).



**Figure 3 :** Portrait robot avancé mettant en évidence l'ensemble des caractères renseignés.

le portrait robot (Grard, 1996). Ainsi, dans le cas de l'exemple tiré du logiciel AdventOI (Figure 4), il existe quatre espèces ayant un coefficient de similarité de 100% avec le portrait robot. Les 196 autres espèces connues par le logiciel ont un coefficient de similarité allant de 97% à 0% en fonction du nombre de caractères correctement renseignés et du poids de chacun des caractères. Chaque état de caractère peut en effet être pondéré en fonction de sa fiabilité botanique, de son degré de variabilité, de la perception qui peut en être faite par les utilisateurs ou encore de la quantité d'information qu'il contient. Ainsi, dans le cas d'un écoulement de latex, choisir l'état de caractère « latex jaune » contient deux informations : qu'il y a du latex et que celui-ci est jaune ; et ceci par opposition au caractère « pas de latex » qui en fait peut masquer une incertitude : « il n'y a pas de latex » ou « je n'ai pas vu de latex ». Nous donnerons alors un poids relatif plus faible à l'état « pas de latex » qu'à l'état « latex jaune ».



**Figure 4 :** Lors de la visualisation des résultats, le portrait robot se place en icône, sous laquelle les espèces sont listées par ordre de similarité. La fiche descriptive illustrée de l'espèce en tête de liste s'affiche par défaut, mais n'importe quelle fiche est accessible par un click sur le nom d'espèce.

La liste des espèces triées par ordre décroissant de similarité et leurs fiches descriptives sont accessibles à tout moment par la fonction « Résultats » (Figure 4). La fiche de n'importe quelle espèce est accessible même si son coefficient de similarité est inférieur à 100%. Il n'est donc pas nécessaire de renseigner le portrait robot jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une seule espèce à 100%. L'utilisateur peut ainsi comparer les fiches descriptives des quelques espèces qui se trouvent en tête de liste.

Lorsque plusieurs espèces ont un coefficient de 100% et que l'utilisateur ne sait quel nouveau caractère renseigner, il peut utiliser la fonction « Recherche » du logiciel, afin de choisir le caractère le plus pertinent pour séparer ce groupe d'espèces. Si le caractère proposé par le logiciel ne peut être renseigné (organe manquant ou peu visible sur l'échantillon), l'utilisateur peut demander au logiciel un autre caractère jusqu'à ce qu'il soit en mesure de le renseigner. Ainsi, l'utilisateur peut être plus ou moins assisté par le logiciel dans son processus de construction du portrait robot et d'identification.

Si une espèce a un coefficient de similarité inférieur à 100%, le logiciel affiche un éclair rouge pour mettre en évidence le ou les caractères renseignés dans le portrait robot qui ne correspondent pas à l'espèce considérée. L'utilisateur peut alors revenir à la fenêtre du portrait robot sur lequel les caractères mal renseignés sont indiqués par une flèche rouge. Ces caractères peuvent ainsi être modifiés sans perturber les autres caractères déjà renseignés.

Un utilisateur averti ayant identifié l'espèce sans utiliser le portrait robot peut accéder directement aux fiches descriptives pour confirmer son identification ou obtenir des informations sur l'espèce. Il pourra alors y accéder par tout type de nom scientifique (accepté ou synonyme ou par les noms vernaculaires).

### Les fiches descriptives

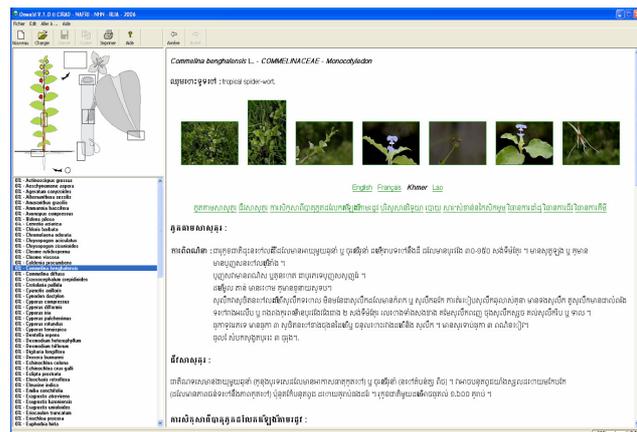
**Les fiches descriptives** sont des pages au format HTML. Le logiciel accède à ces fiches soit depuis le CD-Rom de l'application ou le disque dur, soit via Internet ou Intranet depuis un serveur Web dont l'adresse peut être mentionnée dans les paramètres optionnels du logiciel. De cette façon, l'utilisateur accède constamment à des fiches d'information actualisées et l'auteur n'a pas besoin d'éditer de nouvelle version. Il met à jour les fiches au fur et à mesure de besoins. Les fiches descriptives

mentionnent le code international EPPO de l'espèce (EPPO, 2008), son nom scientifique accepté ainsi que ses différents synonymes et noms communs. Une série de photos à différents stades de développement et portant sur différents organes caractéristiques ainsi qu'un dessin botanique, illustrent la plante. Une carte de distribution peut être présentée. La description de la plante porte sur la plantule et l'adulte décrivant tous ses caractères ce qui permet d'en vérifier l'identification. Des informations sur la biologie, l'écologie, le degré de nuisibilité, les usages, sont plus ou moins détaillées selon les applications réalisées. Pour l'ensemble de ces descriptions et informations, l'utilisation d'un minimum de termes techniques est nécessaire. Aussi, chacun d'entre eux fait l'objet d'un lien hyper texte permettant d'obtenir une définition illustrée pour en faciliter la compréhension.

*Disponible en plusieurs langues*

**Le multilinguisme** est utilisé pour les applications à vocation nationale ou régionale pluriethnique et multilingue, tant pour le portrait robot que pour les fiches d'information. Ces dernières peuvent être gérées de façon multilingue et multi-typographique. C'est le cas d'applications comme Oscar pour la plaine Indo-gangétique (Inde) qui gère des fiches en bengali, en anglais, en urdu et en hindi et Oswald pour le Laos et le Cambodge qui gère les fiches en français, en anglais, en khmer et en lao. La Figure 5 illustre une fiche descriptive écrite en caractères khmer pour le logiciel Oswald.

**Figure 5 :** Fiche descriptive de *Commelina benghalensis* écrite en langue et typographie khmer dans l'application Oswald.



*Le développement multi-plateforme*

**Le développement multi-plateforme** permet différentes utilisations. Les premières applications étaient développées en langage Visual Basic, pour fonctionner à partir d'un cdrom sous système d'exploitation Windows. Les plus récentes sont développées en langage Visual Basic 6 et en langage Java de façon à fonctionner selon différents modes sur différentes plateformes :

- Identification et information directement via Internet,
- Identification sur PC à partir d'un IDAO installé depuis un cdrom ou téléchargé depuis un site Web et information via Internet



**Figure 6 :** Identification d'adventice à l'aide de l'application Oswald dans un champ au Laos, à l'aide d'un PC ultra mobile.

- Identification sur PC et information depuis cdrom
- Identification et information sur PC ultra mobile de terrain (Figure 6)

## Discussion

L'identification des adventices n'est pas chose facile, mais elle est très importante pour une gestion appropriée de l'enherbement. Jusque dans les années 90, il n'y avait que trois types d'outils pour aider les usagers à mettre un nom sur une adventice :

- (1) **L'apprentissage oral avec une personne compétente.** Cette méthode utilise préférentiellement les noms communs des espèces ce qui se traduit souvent par des ambiguïtés. En effet, nombre d'espèces ont le même nom commun et chaque espèce peut avoir plusieurs noms communs qui changent d'une région à l'autre. Ceci ne permet pas toujours une bonne fiabilité de l'information, sans compter les confusions possibles entre espèces apparemment semblables.
- (2) **L'utilisation des flores classiques.** Cette méthode présente différentes contraintes. Basées sur la classification Linnéenne, elles ne permettent pas l'identification d'un échantillon incomplet (sans fleur) ou d'une jeune plante, stade auquel l'adventice doit être identifiée. Elles utilisent une terminologie technique difficile à comprendre pour des non-spécialistes et procède par clé dichotomique qui ne tolère pas l'erreur, ni l'absence de réponse. De plus, ces clés nécessitent généralement de renseigner un grand nombre de caractères avant d'arriver à la réponse.
- (3) **Les manuels de terrains.** Ces manuels sont plus faciles à utiliser que les flores par des non-spécialistes, car ne ils possèdent généralement pas de système d'identification. On procède principalement par comparaison d'images. La limite d'utilisation de ces manuels dépend de la qualité et de la pertinence des photos ainsi que de la qualité des descriptions qui les accompagnent. En effet, nombre de manuels présentent des photos souvent imprécises (floues, trop éloignées pour distinguer les détails) et des descriptions parfois trop simplifiées pour permettre à l'utilisateur de confirmer une identification. Le nombre d'espèces décrites est généralement limité.

L'idée d'utiliser les capacités informatiques pour identifier des plantes a émergé dans les années 70. L'arrivée du multimédia et d'Internet a ouvert de nouvelles opportunités pour construire de nouveaux types d'outils. Différents systèmes ont alors été utilisés en botanique et parfois en malherbologie :

Il y a par exemple les clés d'identification classiques utilisant du texte ou des graphiques au travers de clés dichotomiques ou multichotomiques, comme dans Malherb (Lonchamp *et al.*, 1991). Le système Delta a été développé pour standardiser la description des plantes (Dallwitz, 1980) mais son développement, trop lié aux outils qui le manipulent, a mis en évidence le besoin de mettre sur pied un standard permettant l'interopérabilité, ce à quoi s'attache le TDWG (Taxonomic Data Working Group) au travers du format SDD (Structured Descriptive Data). Les caractères de description sont organisés en matrice, à partir de laquelle des clés d'identification peuvent être générées automatiquement (Pankhurst, 1970; 1988). Actuellement, différents systèmes d'identification botanique utilisent cette approche comme Intkey (Dallwitz, 1993), Lucid (CBIT, 2004; Krings, 2003; Navie, 2002; 2004)<sup>1</sup> ou Polyclave (UTDB, 2003)<sup>2</sup>. Les systèmes experts tentent de simuler le raisonnement humain. Ils utilisent une base d'événements, des règles de décisions applicables à ces événements et un moteur d'inférence qui active les règles en fonction des événements. Ce type d'approche a été employé en Argentine pour le logiciel d'identification d'adventices Sitrema (Casali *et al.*, 1998). La méthode des

---

<sup>1</sup> CBIT : Center for Biological Information and Technology

<sup>2</sup> UTDB : University of Toronto Department of Botany

réseaux neuro-mimétiques a également été utilisée pour permettre la reconnaissance automatique de plante à partir d'images de feuilles scannées (Angel, 1995).

Il n'est pas aisé de comparer un système informatique d'identification à d'autres. Dallwitz (2000) procéda à la comparaison de sept logiciels d'identification botanique en considérant que la pertinence de ce genre d'outils dépend de la combinaison de trois éléments : (1) l'efficacité du système d'identification, (2) la qualité de l'information sur les espèces, (3) l'ergonomie de l'application. Il reçut la critique de Thiele (2000), qui montra à quel point il était difficile de comparer objectivement des logiciels quand le type d'utilisation et les spécificités de chaque système ne sont pas complètement gérés par le comparateur. De plus, il apparaît difficile de juger globalement un outil car l'utilisateur, en fonction de son degré de connaissance de la botanique ou de ses objectifs d'utilisation de l'outil, peut préférentiellement prendre en compte l'un ou l'autre de ces éléments. Vignes et Kuntzelmann (2008) ont effectué dans le cadre du programme EDIT<sup>3</sup>, l'analyse comparative de cinq outils informatiques d'identification taxonomique en fonction des attentes d'un panel d'utilisateurs potentiels. Ce travail constitue une étape importante pour les futurs développements de ce type de logiciel, puisqu'il synthétise l'ensemble des caractéristiques et fonctionnalités des outils d'identification taxonomique les plus répandus à l'heure actuelle. IDAO n'est pas comparable par ce type d'analyse, étant donné la spécificité de son interface graphique, qui varie d'une application à une autre, ainsi que par le fait qu'il n'intègre pas d'outil de réalisation d'une application. Sa généricité, et la mise en place d'outils accessibles de création de nouvelles applications graphiques sont actuellement en cours. Au travers de l'analyse des méthodes de développement et de production des applications IDAO et de l'expérience d'utilisation de ce type d'outil par différents utilisateurs (botanistes confirmés, agronomes, étudiants, techniciens agricoles, agriculteurs, citoyens) dans différentes régions du monde depuis 10 ans et pour différents objectifs (recherche, développement, enseignement), nous pouvons cependant mettre en évidence certaines caractéristiques de ce système. Il permet par son système de portrait robot d'identifier des plantes à n'importe quel stade de développement, au travers d'une approche entièrement graphique. Il allie un libre choix de cheminement de la part de l'utilisateur puisque n'importe quel caractère est accessible dans n'importe quel ordre avec une certaine tolérance aux erreurs. Il fait essentiellement appel à la capacité d'observation de l'utilisateur et non à des connaissances particulières. De plus, différentes fonctionnalités peuvent aider l'utilisateur dans son cheminement (caractères choisis automatiquement, erreurs corrigeables...). Il allie l'identification des espèces à l'information sur les espèces au travers de la mise à disposition de fiches descriptives actualisables. Il est utilisable sur différents types de plateformes informatiques en local, ou sur Internet, au bureau ou sur le terrain. Cependant, IDAO présente également un certain nombre de contraintes. Jusqu'à présent les outils dédiés aux adventices ne concernent que des flores de 50 et 200 espèces, bien que d'autres applications, notamment sur les arbres du Sahel traitent jusqu'à 361 espèces (Bonnet *et al.*, 2005). S'il est techniquement tout à fait possible d'identifier plusieurs milliers d'espèces par ce système, la limite dans la production de tels logiciels réside essentiellement dans le temps nécessaire à la compilation de l'ensemble des caractères pour l'ensemble des espèces et à la synthèse des informations pour la construction du portrait robot et la réalisation de fiches descriptives illustrées. Il n'est actuellement pas possible de développer une nouvelle application en multi-partenariat direct, c'est-à-dire avec une procédure qui permette à chaque partenaire de mettre à jour directement les informations tant dans la base des caractères du portrait robot que dans la base d'information sur les espèces. Chaque application est développée spécifiquement pour la flore prise en compte. S'il est possible au développeur de mettre à jour régulièrement les fiches descriptives consultables depuis un serveur Web, en revanche, il n'est pas possible pour un utilisateur de compléter les fiches descriptives du logiciel avec de nouvelles informations.

Aussi, dans le cadre de l'évolution de l'outil IDAO, nous prévoyons de déployer un système générique associé à une interface de construction d'application, une bibliothèque de caractères et de modalités de

---

<sup>3</sup> EDIT : European Distributed Institute of Taxonomy

caractères. Cet outil devrait permettre la construction de différents types de portrait robot portant sur des caractères morphologiques, mais également écologiques, chorologiques ou même génétiques (par exemple Barcode). Le format SDD (Structured Descriptive Data) accepté en 2005 comme standard de description des organismes vivants par le TDWG (Taxonomic Data Working Group) (Hagedorn *et al.*, 2005) permet d'intégrer dans un même ensemble les données descriptives des espèces et la structure de ces mêmes données. Ceci a été rendu possible en s'appuyant sur XML (Extensible Markup Language) et permet, de fait, l'usage des fichiers par différents logiciels, ce qui n'est pas possible avec Delta. Ce format a été retenu pour les versions à venir. IDAO devrait également être associé à un module de reconnaissance par analyse d'image permettant à l'utilisateur d'identifier automatiquement une espèce d'après une ou plusieurs images qu'il aura fournies. L'accès aux informations sur les espèces se fera au travers de fiches descriptives produites et régulièrement mises à jour et de liens directs avec des bases d'informations extérieures. Il sera accessible via Internet à partir d'une plateforme informatique qui mettra en relation banques d'images, bases d'information sur les espèces, cartographie et outils d'identification. Cette plateforme permettra soit le travail en partenariat et la mise à disposition de données et de modules informatiques en accès libre, pour la production d'outils d'identification d'intérêt communautaire, soit le téléchargement de composants pour la réalisation d'applications d'utilisation locale. Ces perspectives sont quelques aspects majeurs du projet PI@ntnet qui associera l'UMR<sup>4</sup> AMAP<sup>5</sup>, l'équipe IMEDIA<sup>6</sup> de l'INRIA<sup>7</sup> et l'association Téla-Botanica à partir de 2009.

## Conclusion

IDAO a été conçu pour aider des utilisateurs non-botanistes à identifier des plantes et notamment des adventices à n'importe quel stade de développement, facilement et avec une grande précision scientifique, grâce à une approche entièrement graphique. L'évolution de ce type de système d'identification s'oriente notamment vers la mise à disposition du système en libre accès sur une plateforme Web pour permettre à quiconque de développer sa propre application à partir de bibliothèques et de modules informatiques préexistants et d'alimenter la plateforme et les bases d'information dans une démarche de mise en réseau et en accès libre de la connaissance. La combinaison de la reconnaissance par portrait robot et par analyse automatique d'images devrait apporter une plus grande souplesse d'utilisation du système pour l'identification des plantes allant peut-être un jour jusqu'à l'identification d'une mauvaise herbe à partir d'une photo prise au champ avec un téléphone portable et transmise par Wap au serveur.

## Références bibliographiques

- Angel G., 1995. Aide à l'identification d'arbres de Guyane française par des techniques d'analyse d'images et d'intelligence artificielle - Application à la reconnaissance de forme de feuilles. Thèse de doctorat, Montpellier II, Montpellier, France.
- Bonnet P., Arbonnier M., Grard P., 2005. Ligneux du Sahel.V.1.0. Cirad, Montpellier, France.Cdrom.
- Casali A., Corti R., D'Agostino E., Dip L., Faccini D., Leguizamon E., Pluss J.J., 1998. Sistema interactivo para el tratamiento integral de malezas. I. Identificación de malezas. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 33, 809-821.

---

<sup>4</sup> UMR : Unité Mixte de Recherche

<sup>5</sup> AMAP : botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes

<sup>6</sup> IMEDIA : Images et multiMEDIaG

<sup>7</sup> INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

- CBIT. 2004. Lucidcentral. Center for Biological Information Technology, the University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia. <http://www.lucidcentral.com/>.
- Dallwitz M.J., 1980. A general system for coding taxonomic descriptions. *Taxon* 29: 41-46.
- Dallwitz M.J., 1993. DELTA and INTKEY. In Fortuner, R. [ed.], *Advances in Computer Methods for Systematic Biology: Artificial intelligence, Databases, Computer Vision*, 287-296. Johns Hopkins University Press, Baltimore, London, UK.
- Dallwitz M.J., 2000. A Comparison of Interactive Identification Programs. <http://biodiversity.uno.edu/delta/www/comparison.htm>.
- EPPO, 2008. EPPO Plant Protection Thesaurus (EPPT) EPPO.
- Grard P., 1996. Contribution à la méthodologie de l'identification des plantes assistée par ordinateur. Thèse de doctorat, Montpellier II, Montpellier, France.
- Grard P., Le Bourgeois T., Merlier H., 1996. *Adventrop Doc : Les adventices d'Afrique soudano-sahélienne.V. 1.1.* CIRAD-CA, Montpellier, France. Cdrom.
- Grard P., 2005. Open Source Simple Computer for Agriculture in Rural Areas (OSCAR). French Institute of Pondicherry, Pondicherry, India. <http://www.ifpindia.org/oscarasia/>.
- Grard P., Homsombath K., Kessler P., Khuon E., Le Bourgeois T., Prospéri J., Risdale C., 2006. Oswald V.1.0: A multimedia identification system of the major weeds of rice paddy fields of Cambodia and Lao P.D.R. In Cirad [ed.]. Cirad, Montpellier, France. Cdrom.
- Hagedorn G., Thiele K., Morris R., Heidorn P.B., 2005. The structured Descriptive Data (SDD) w3c-xml-schema, version 1.0. Biodiversity Information Standards (TDWG). <http://www.tdwg.org/standards/116/>.
- Krings A., 2003. *Common Grasses of Carolinas*. Applied Taxonomic Solutions, Raleigh, USA. Cdrom.
- Le Bourgeois T., Jeuffrault E., Grard P., Carrara A., 2000. *AdvenRun V.1.0. - Principales mauvaises herbes de La Réunion.V.1.0.* Cirad - SPV (cédérom), Montpellier, France. Cdrom.
- Le Bourgeois T., Marnotte P., 2002. Modifier les itinéraires techniques : La lutte contre les mauvaises herbes. In Cirad-Gret-MAE [ed.], *Mémento de l'agronome*, 663-684, Montpellier, France.
- Le Bourgeois T., Carrara A., Dodet M., Dogley W., Gaungoo A., Grard P., Ibrahim Y., Jeuffrault E., Lebreton G., Poilecot P., Prosperi J., Randriamampianina J.A., Andrianaivo A.P., Théveny F., 2008. *Advent-OI : Principales adventices des îles du sud-ouest de l'Océan Indien.V.1.0.* In Cirad [ed.]. Cirad, Montpellier, France. Cdrom.
- Lonchamp J.P., Barralis G., Gasquez J., Jauzein P., Kerguelen M., Leclerc J., Maillet J., 1991. Malherb, logiciels de reconnaissance des mauvaises herbes des cultures : approche botanique. *Weed Research* 31, 237-245.
- Navie S., 2002. *Suburban and Environmental Weeds: An identification and information system for south-east Queensland and northern New South Wales*. CPITT University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia. CD.
- Navie S., 2004. *Declared Plants of Australia*. CBIT University of Queensland. CDROM.
- Pankhurst R.J., 1970. A computer program for generating diagnostic keys. *Computer Journal* 12, 145-151.
- Pankhurst R.J., 1988. An interactive program for the construction of identification keys. *Taxon* 37, 747-755.
- Thiele K., 2000. A Critique of Dallwitz's 'A Comparison of interactive Identification Programs'. <http://biodiversity.uno.edu/delta/www/thiele.htm>.
- UTDB, 2003. Welcome to Polyclave. University of Toronto Department of Botany. <http://prod.library.utoronto.ca/polyclave/index.html>.
- Vignes R., Kuntzelmann E., 2008. C5.49 First test results in the EDIT review environment. Towards the European Distributed Institute of Taxonomy.

## **Evaluation de la présence d'adventices dans les lots de semences : méthodes internationales standardisées et apport de la vision artificielle à l'évolution des méthodes.**

**M.R. Mannino, V. Muracciole, G. Cesbron, C. Dussetour, J.C. Stéphan, J. Léchappé**

Station Nationale d'Essais de Semences, GEVES, rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé cedex

Correspondance : mannino.maria-rosaria@wanadoo.fr

### **Résumé**

L'article présente les méthodes d'analyse de la pureté spécifique des semences mises en œuvre à la SNES (Station nationale d'Essais de Semences) dans le cadre du contrôle officiel des lots en vue de leur commercialisation. L'évolution du cadre réglementaire des analyses (Directives Européennes et Règlement Technique de Certification du GNIS) est aussi présentée, ainsi que la conséquente évolution des méthodes d'analyse, adaptées pour pouvoir répondre aux nouvelles exigences.

L'analyse des résultats produits par la SNES sur plusieurs années permet de tracer l'évolution de la présence d'espèces étrangères dans les lots de semences. Dans l'article est présenté un extrait des résultats obtenus dans les dix dernières campagnes.

L'analyse des semences selon les méthodes internationales standardisées relève de la perception humaine et de l'expertise des analystes. De nombreux systèmes de vision artificielle ont été réalisés ou font l'objet aujourd'hui de recherche. L'article présente les résultats des travaux conduits à la SNES dans ce domaine, en partenariat avec l'ESEO, le LISA et l'ENITIAA – INRA. Ils ont conduit à la réalisation d'un prototype automatisé pour l'analyse de tournesol, capable d'acquérir et traiter des images de semences en chute libre pour répondre aux exigences réglementaires sur la présence de semences étrangères.

### **Introduction**

Un des facteurs de contrôle de la flore adventice au champ est l'utilisation de semences propres. Ce principe était à la base de la définition des exigences réglementaires d'abord françaises et ensuite européennes en matière de qualité des semences commercialisées à partir des années 30. Après une longue période de développement de la technique de désherbage, la nécessité d'emploi de semences indemnes d'espèces étrangères apparaît à nouveau comme un facteur de réussite de la culture. L'emploi de lots à pureté spécifique élevée réduit la diffusion d'espèces à haut degré de nuisibilité (*Avena fatua* L., *Rumex* spp.), ainsi que celles d'espèces difficilement contrôlables (*Alopecurus myosuroides* Huds.) ou absentes dans certaines régions (*Orobanche* sp.).

### **Le contrôle des lots de semences pour la présence d'espèces étrangères : la réglementation**

Les semences étrangères recherchées dans les lots et soumises aux **normes européennes et nationales** sont spécifiques d'un point de vue agronomique aux espèces cultivées dans lesquelles elles sont recherchées. Ainsi, les espèces *Alopecurus myosuroides* Huds. et *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski sont recherchées lors des analyses de contrôle des graminées fourragères car de contrôle difficile au champ et difficilement éliminables par le triage en usine. Pour les mêmes raisons, les espèces du genre *Melilotus* font l'objet de recherches dans les semences de légumineuses fourragères.

D'autres, comme *Avena fatua* L., *Avena sterilis* L., *Rumex* spp., *Cuscuta* spp., reconnues comme très nuisibles dans toute culture, sont plus largement recherchées dans les semences des différents groupes d'espèces, fourragères, protéagineuses, oléagineuses, céréales et plantes à fibres. Leurs seuils de tolérance dans les lots de semences font l'objet de **Directives Européennes et du Règlement Technique de Certification du GNIS**. Ces espèces sont également mentionnées dans les normes du commerce des semences de nombreux autres pays en dehors d'Europe.



**Figure 1** : *Avena fatua* L. (à gauche) et *Cuscuta* spp. (à droite). Pour ces espèces le règlement technique de certification établit des normes très strictes (0 dans un échantillon de poids fixé) pour des nombreuses espèces cultivées.



Les standards de qualité évoluent lentement au cours des années, en fonction de différents facteurs tels que le niveau de risque qui est considéré comme acceptable lors de la mise en place d'une culture, la faisabilité technique et économique de production de lots de semences plus ou moins indemnes en semences étrangères, les intérêts économiques et les contraintes techniques de production des différents pays intervenant dans la définition de ces normes.

Au début des années trente, les exigences n'étaient pas les mêmes qu'aujourd'hui. Ainsi, 20 semences de *Cuscuta* spp. dans un échantillon de 100 grammes de semences de luzerne était un taux acceptable, alors qu'aujourd'hui la norme européenne est de 0 semence dans un échantillon de même taille.

### **Le contrôle des lots de semences pour la présence d'espèces étrangères : les méthodes standardisées**

Parallèlement à la réglementation, les méthodes d'analyse des semences ont été adaptées pour pouvoir répondre à des exigences en évolution et aux nouvelles contraintes.

Depuis 1924, l'**ISTA (International Seed Testing Association)**, association internationale des laboratoires d'analyse des semences, met au point et fait évoluer les méthodes d'analyse grâce au travail technique et scientifique mené au sein de ses comités techniques.

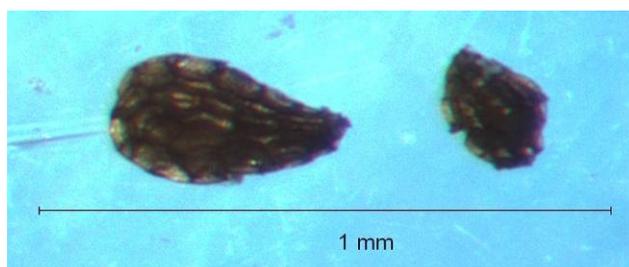
En 1956 l'ISTA a créé le **Comité de Pureté**, comité technique dont une des missions est encore aujourd'hui de faire évoluer ou de mettre au point les méthodes d'évaluation de la pureté d'espèce des semences. Des nombreux thèmes abordés dans les programmes de travail du comité concernent le domaine de l'identification d'espèces : la distinction entre *Poa trivialis* L. et *Poa pratensis* L., la morphologie et l'identification des semences d'adventices et d'espèces cultivées, l'évaluation des semences pures, les espèces tropicales et subtropicales, la classification des semences immatures, l'identification et l'évaluation de la nuisibilité des espèces du genre *Avena* et de leurs hybrides, l'analyse de semences du genre *Bromus*, le développement de la « Universal List of Species » (Liste Universelle d'Espèces). Cette liste comprend 130 espèces qui sont reconnues de large diffusion et conseillées par l'ISTA comme espèces des collections de référence des laboratoires accrédités. Associé à cette liste,

un document de référence, en cours d'élaboration, illustre les semences de ces espèces avec des descriptions botaniques et des photos.

En ce qui concerne la présence d'adventices, deux méthodes d'analyse standardisées par l'ISTA sont utilisées aujourd'hui dans le cadre de l'évaluation de la qualité des lots en vue de leur commercialisation : la pureté spécifique et la recherche de semences étrangères. Grâce à ces analyses, la SNES (Station Nationale d'Essais de Semences), laboratoire officiel de contrôle des lots, obtient les valeurs de pureté spécifique et de teneur en semences d'autres plantes qui permettent d'évaluer la qualité des semences commercialisées par rapport aux standards de qualité du Règlement Technique de Certification.

L'**analyse de pureté** consiste dans la séparation de l'échantillon d'environ 2500 semences en trois composants : 'semences pures', 'semences d'autres plantes' et 'matières inertes'. Cette séparation se fait sur la base d'un tri manuel et d'une observation de chaque élément qui constitue l'échantillon.

Les résultats obtenus, exprimés en pourcentages de semences pures et d'impuretés, permettent l'évaluation du lot de semences par rapport aux valeurs minimales de teneur en semences pures de l'espèce cultivée et aux valeurs maximales de semences étrangères prévues par la réglementation. L'**analyse de dénombrement** consiste dans la recherche dans un échantillon d'environ 25 000 semences, des semences appartenant à d'autres espèces, qui peuvent être la totalité des espèces (lots de catégorie de base) ou certaines espèces particulières indiquées dans le Règlement Technique de Certification (lots de catégorie certifiée). Les résultats sont exprimés en nombre de semences de chaque espèce étrangère détectée dans un échantillon de poids déterminé et représentatif du lot. Elles permettent par exemple l'évaluation du lot par rapport aux normes qui concernent des espèces particulièrement nuisibles, comme *Avena fatua* L., *Avena sterilis* L., *Cuscuta* spp. *Melilotus* spp. *Orobanche* spp. La diffusion en Europe d'espèces du genre *Orobanche* inquiète aujourd'hui de plus en plus les producteurs de colza et tournesol. Cette espèce, fait l'objet de normes très strictes au champ et au laboratoire (taux 0 exigé pour la certification des cultures et des lots de semences). A cause de la taille très réduite des semences (0,2-0,5 mm), leur détection demande l'emploi d'outils et de méthodes particulières d'analyse (tamisage et observation au microscope, méthode par filtration).



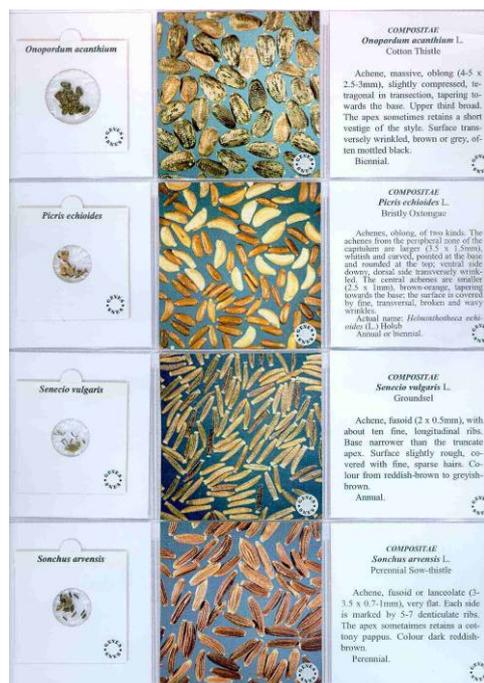
**Figure 2 :** Semences d'*Orobanche* sp. Leur taille très réduite (0,2-0,5 mm) rend nécessaire l'adoption de précaution pour en éviter la perte lors des manipulations de l'échantillon et l'observation à fort grossissement (de 45x à plus de 350x).

Les normes de qualité qui portent sur des semences étrangères particulières impliquent l'identification au niveau taxonomique de l'espèce. Pour l'appréciation des semences pures, sont utilisées les définitions de l'ISTA (environ 60 définitions différentes) qui décrivent l'unité de semence en détaillant les différentes parties qui constituent la « semence pure ». Pour l'identification des semences d'espèces étrangères, la morphologie de la semence et de ses différentes parties (taille, forme, couleur, texture du tégument du fruit ou de la graine, morphologie de l'embryon, présences d'appendices) est prise en compte pour permettre la classification dans les espèces ou genres d'appartenance. Puisque les lots destinés au commerce sont issus de processus de triage en usine de production, les impuretés résiduelles sont caractérisées très souvent par une taille et une morphologie très proches de l'espèce analysée, d'où la difficulté de ces analyses et la haute technicité qu'elles requièrent, en particulier des

connaissances approfondies en botanique et taxonomie pour l'identification des semences pures et celle des semences étrangères.

Pour la réalisation de ce travail d'analyse, le laboratoire dispose aussi d'outils adaptés : équipements d'aide à la séparation et identification des composants, documents techniques internes et externes et collections de semences de référence. Une **collection de 17 000 espèces**, une de plus importantes au monde, est présente au laboratoire et utilisée lors des identifications plus complexes.

Le laboratoire produit aussi une collection de semences contenant les échantillons, les descriptions botaniques et les photos de 175 espèces parmi les plus fréquentes. Cet ouvrage est commercialisé dans ses deux versions en français et en anglais. Il sera complété par un deuxième tome contenant 100 autres espèces dont la publication est prévue en 2009.



**Figure 3 :** Page de l'ouvrage "DESCRIPTIVE AND ILLUSTRATED COLLECTION OF MAIN WEED SEEDS" produit par la SNES et édité par le GEVES (version en anglais).

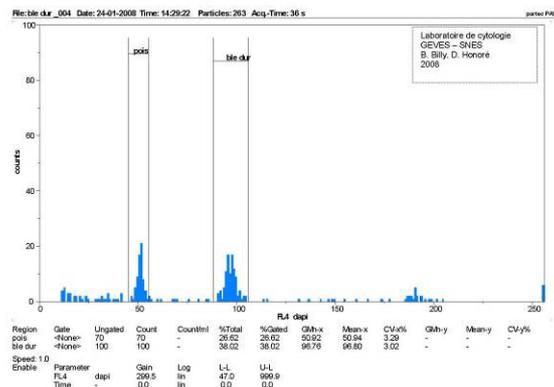
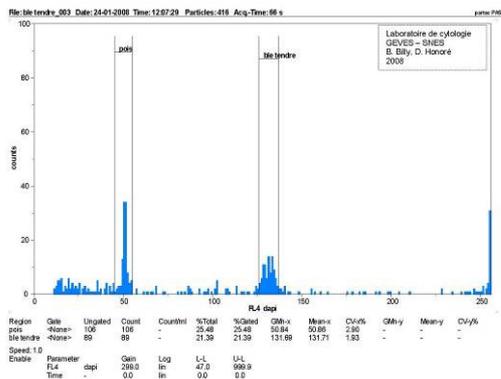
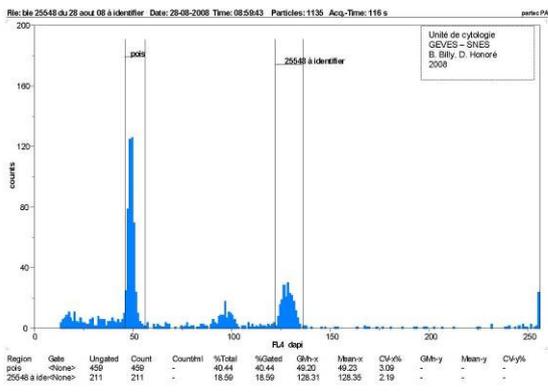
### Le contrôle des lots de semences pour la présence d'espèces étrangères : les méthodes complémentaires

Lors de l'analyse de pureté spécifique et dénombrement, il est parfois nécessaire de recourir à des outils pour identifier des semences étrangères rares, déformées ou douteuses ou également pour distinguer entre semences d'espèces différentes, mais très proches morphologiquement.

**Le test au phénol** est réalisé en complément de l'analyse de dénombrement dans le but de détecter la présence de *Triticum aestivum* L. dans les échantillons de *Triticum durum* Desf. Le péricarpe de *Triticum aestivum* L. est imprégné par une solution à 1% de phénol (acide phénique), puis exposé à l'air en conditions d'obscurité. Les caryopses de *Triticum aestivum* L. réagissent en prenant une teinte plus ou moins foncée due à l'action des phénol-oxydases contenues dans le péricarpe du grain ce qui permet leur distinction des caryopses de *Triticum durum* Desf. qui ne modifient pas leur couleur.



**Figure 3 :** Après réalisation du test à l'acide phénique (à droite), le caryopse de *Triticum aestivum* L. se colore en noir, ce qui le rend facilement détectable dans un échantillon de semences de *Triticum durum* Desf. qui ne modifient pas leur couleur après traitement (photos SNES).

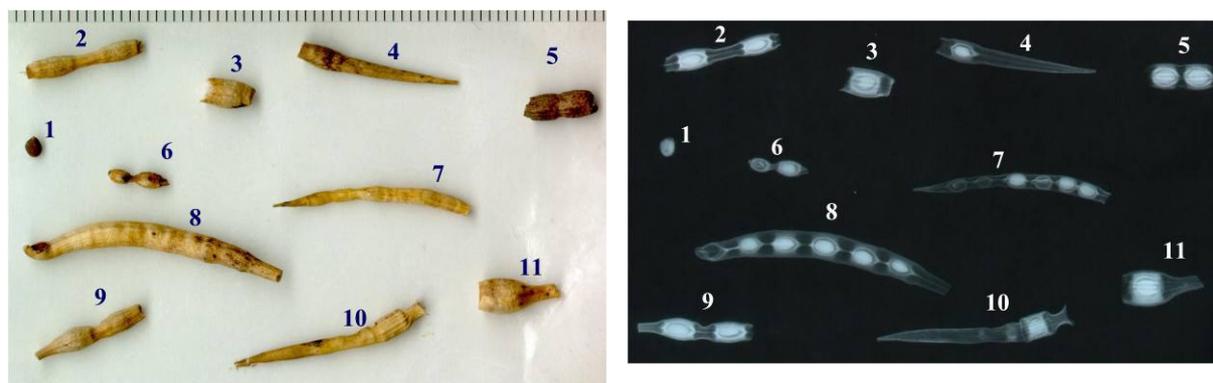


**Figure 4 :** La cytométrie en flux a confirmé l'appartenance de la semence au milieu à l'espèce *Triticum durum* Desf. Le pic de fluorescence de son ADN marqué au DAPI coïncide avec celui de la semence témoin à droite dans la photo.

Des distinctions entre espèces sur la base de la taille des génomes peuvent être révélées par **cytométrie en flux**. La méthode, mise en place au laboratoire de Cytologie de la SNES, emploie un fluorochrome, le DAPI, qui se lie à l'ADN des noyaux cellulaires. La fluorescence mesurée est proportionnelle à la quantité d'ADN de chaque noyau et donc à la taille du génome de chaque espèce. Ces mesures permettent par comparaison à des témoins connus de confirmer ou infirmer l'identification

d'espèce sur parties d'organes végétaux ou sur semences. Grâce à cette méthode, il est possible de distinguer des espèces dont les semences sont morphologiquement très proches, comme par exemple chez certaines variétés de *Triticum durum* Desf., *Triticum aestivum* L. et *X Triticosecale* spp.

La **radiographie** est une méthode d'analyse de la qualité des semences standardisées par l'International Seed Testing Association (ISTA). Au même titre que d'autres méthodes officielles comme la germination, la pureté spécifique et l'état sanitaire, cette méthode est mise en place à la SNES depuis les années 80 pour l'évaluation de la qualité d'échantillons issus des lots de semences et elle peut faire l'objet de Bulletins Internationaux ISTA. Cette technique, non destructive, permet de mettre en évidence la morphologie interne de fruits et graines. Ceci contribue, au regard des normes ISTA, à en apprécier le degré de nuisibilité.



**Figure 5 :** Images photographiques et radiographiques de siliques de *Raphanus raphanistrum* L. (ravenelle). La mise en évidence de la morphologie interne permet d'évaluer la présence des semences et donc le degré potentiel de nuisibilité en culture (photos SNES).

### Evolution de la présence d'adventices dans les lots de semences

L'analyse des résultats produits par la SNES sur plusieurs années permet de tracer l'évolution de la présence d'espèces étrangères dans les lots de semences. Cet article illustre seulement quelques exemples des exploitations possibles de cette importante base de données.

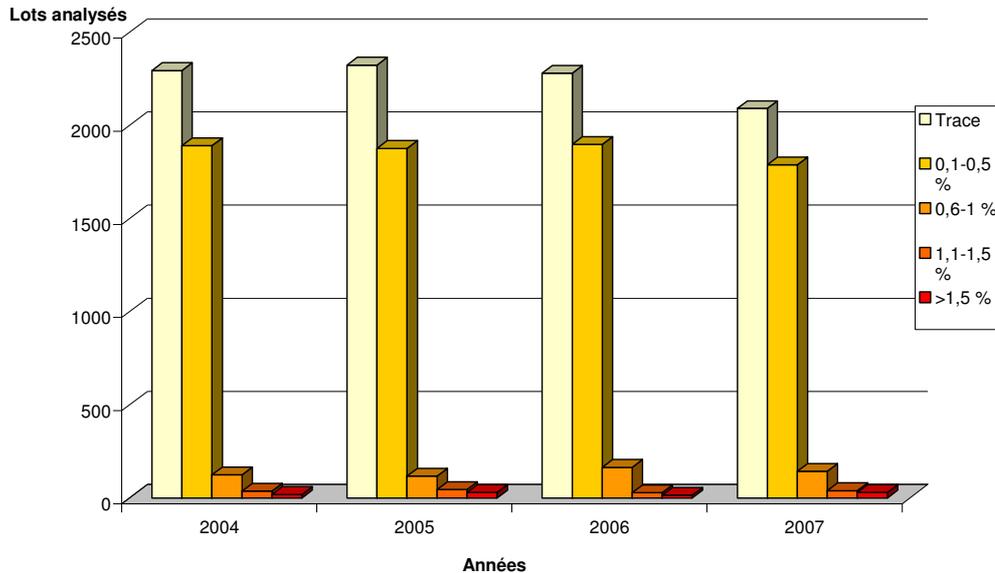
Campagne	Nombre d'échantillons analysés	Nombre d'espèces cultivées analysées	Nombre d'espèces étrangères détectées	Pourcentage d'échantillons avec semences étrangères
98-99	16243	162	386	29
99-00	15441	174	343	28
00-01	16207	147	316	28
01-02	15872	155	332	28
02-03	16434	116	303	28
03-04	17191	119	318	29
04-05	16157	116	317	29
05-06	15847	142	321	29
06-07	15128	132	318	27
07-08	14811	134	328	26

**Tableau 1 :** Echantillons analysés à la SNES, nombre d'espèces cultivées concernées par les contrôles et nombre d'espèces étrangères détectées par campagne.

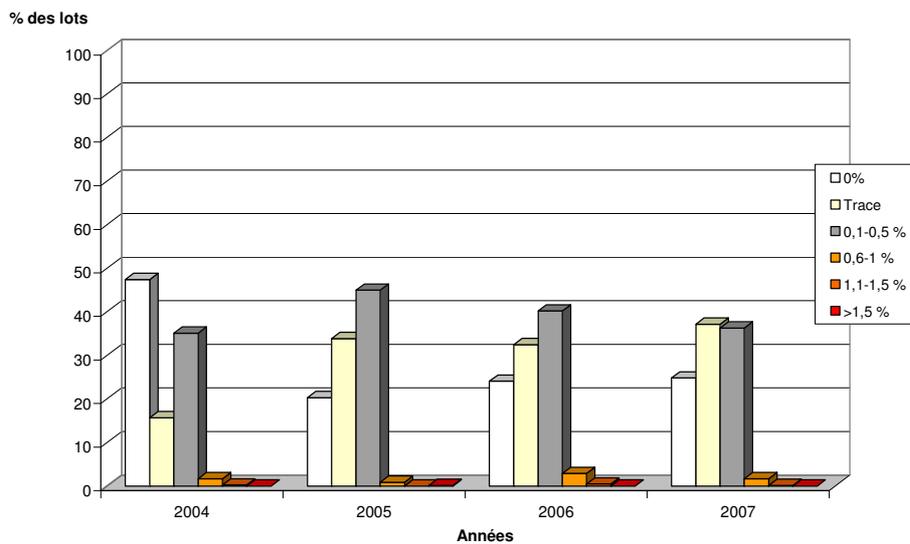
Le laboratoire d'Analyses physiques de la SNES analyse environ 17 000 échantillons représentatifs des lots de semences de plus de 150 différentes espèces en vue de leur commercialisation. Lors de ces

analyses, des graines étrangères sont détectées dans environ 30% des lots, ces graines correspondant à plus de 350 espèces étrangères. Cette proportion varie en fonction des espèces cultivées, des itinéraires techniques de production au champ et des difficultés de triage en usine.

Le pourcentage de semences étrangères dans les lots soumis au contrôle dépasse rarement les seuils de certification qui varient, à titre d'exemple, de 0 % dans le maïs à 0,3 % dans le tournesol, jusqu'à 1,5 % dans les principales espèces graminées et légumineuses fourragères (Figure 6).



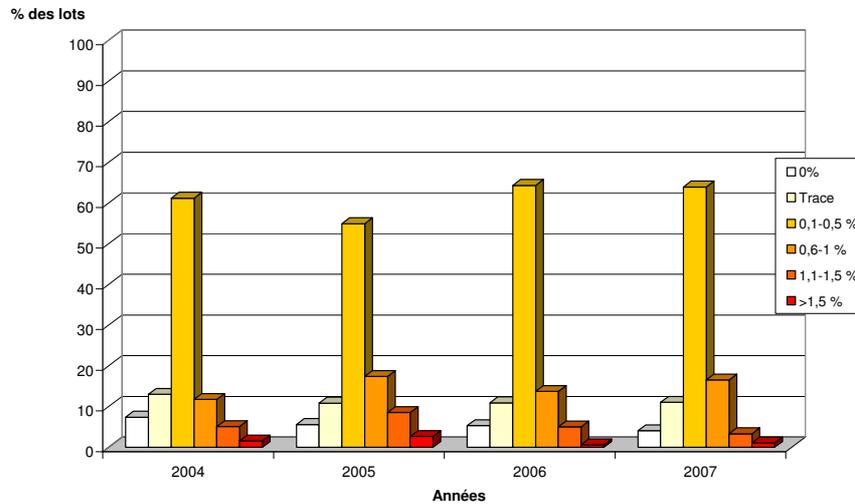
**Figure 6 :** Evolution des lots avec présence de semences étrangères et répartition dans les classes de contamination



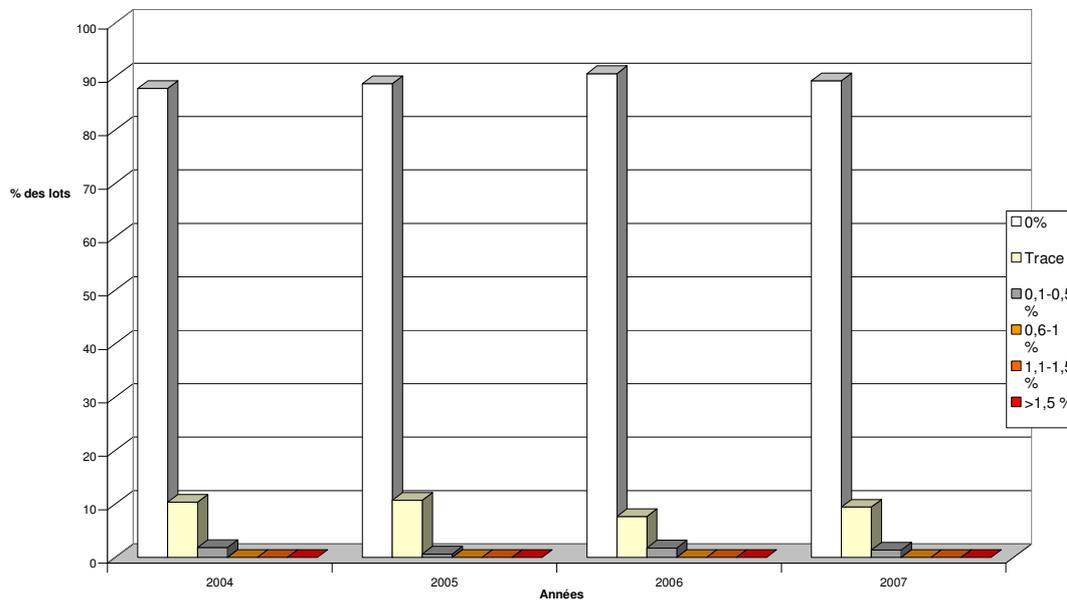
**Figure 7 :** Répartition des lots de *Lolium perenne* L. (ray-grass anglais) avec présences de semences étrangères dans les classes de contamination

La répartition entre classes de contamination varie en fonction des espèces. Les pourcentages plus élevés concernent les espèces fourragères, en particulier les *Poaceae* (graminées). A titre d'exemple, la

proportion de lots avec pourcentage de semences étrangères supérieur à trace est comprise entre 37 et 46 % pour le ray-grass anglais et 80-85 % pour la fétuque élevée (Figures 7 et 8) alors qu'elle ne dépasse pas, dans les quatre dernières années, 2 % des lots de tournesol (Figure 9).

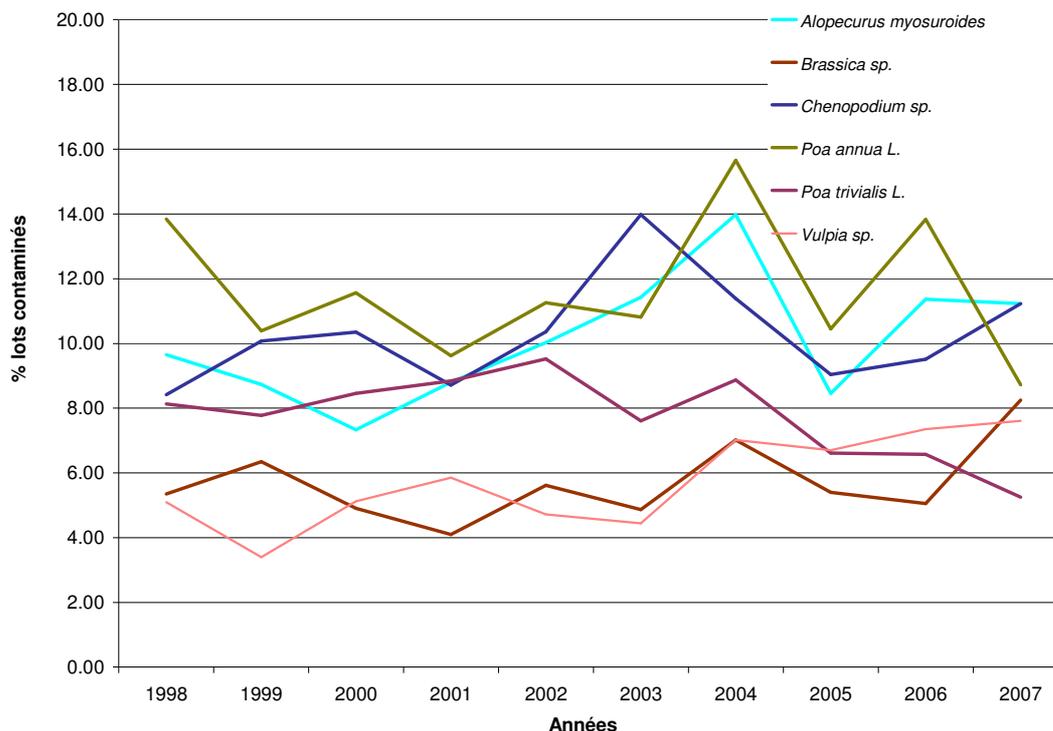


**Figure 8** : Répartition des lots de *Festuca arundinacea* Schreb. (fétuque élevée) avec présences de semences étrangères dans les classes de contamination



**Figure 9** : Répartition des lots d'*Helianthus annuus* L. (tournesol) avec présence de semences étrangères dans les classes de contamination

Environ une vingtaine d'espèces sont à considérer comme les plus fréquentes dans les lots de semences (Figure 10). Il s'agit d'adventices, mais aussi d'autres espèces cultivées. *Alopecurus myosuroides* Huds., *Vulpia* sp., *Brassica* sp., *Chenopodium* sp. montrent des fréquences en augmentation avec des variations importantes d'une années sur l'autre. D'autres, comme *Poa trivialis* L. et *Poa annua* L., apparaissent en diminution.



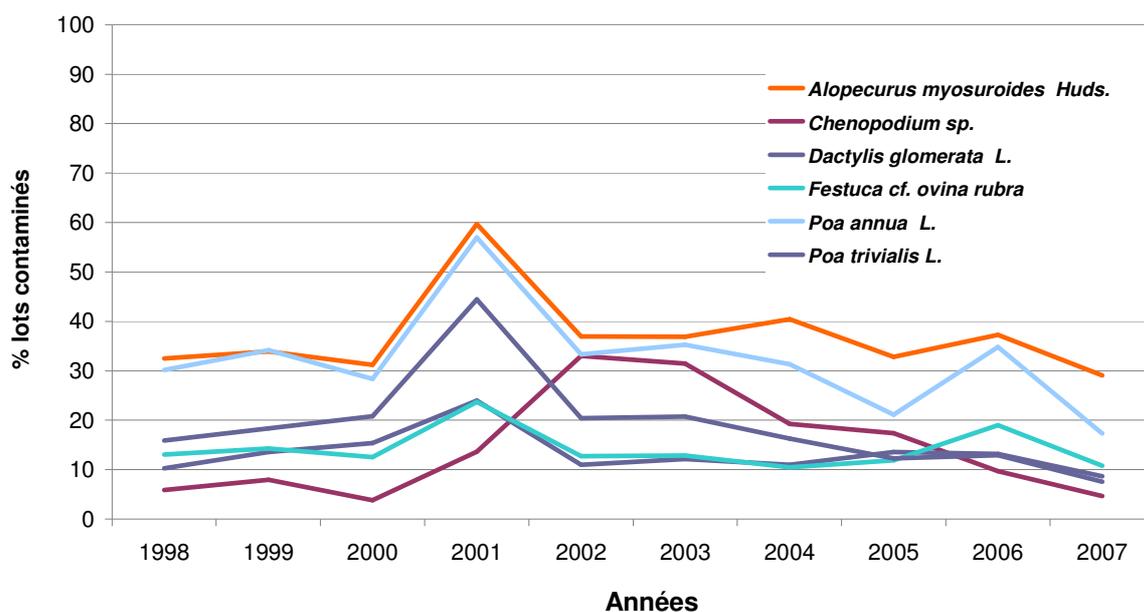
**Figure 10 :** Fréquence de détection des principales espèces étrangères dans les lots contaminés

Certaines adventices apparaissent fréquemment dans les diverses espèces cultivées. C'est le cas de *Chenopodium sp.*, très fréquente dans les lots de ray-grass et de luzerne. D'autres espèces montrent par contre des fréquences de détection variables en fonction de l'espèce cultivée, comme le montrent les figures 11 et 13.

En ce qui concerne plus particulièrement le ray-grass anglais, six espèces sont parmi les plus fréquentes dans les lots (Figure 11). Parmi celles-ci, il est à souligner l'importance de l'*Alopecurus myosuroides* Huds. (Figure 12), adventice soumise à norme selon la réglementation en vigueur, qui présente les fréquences de détection les plus élevées dans les lots au cours de ces dix dernières années.

Les données concernant les fréquences de détection des espèces dans les lots de ray-grass montrent un pic important en 2001 qui peut être dû à des conditions particulières lors de la production des semences au champ.

L'analyse des données acquises sur les lots de luzerne (Figure 13) montre que *Chenopodium sp.*, l'adventice la plus importante pour cette espèce, apparaît en diminution pendant ces dix dernières années. Parmi les espèces les plus représentatives des adventices de la luzerne, *Picris echinoides* L., *Setaria sp.* et *Rumex sp.* présentent des variations pendant la période d'observation, sans montrer des tendances à l'augmentation ou à la baisse.



**Figure 11 :** Fréquence de détection des principales espèces étrangères dans les lots de *Lolium perenne* L. (ray-grass anglais)



A)



B)



C)

**Figure 12 :** A) Plantes d'*Alopecurus myosuroides* Huds. (vulpin) dans une culture de ray-grass (photo FNAMS). B) Semences d'*Alopecurus myosuroides* Huds. (vulpin) et C) de *Lolium perenne* L. (ray-grass anglais) Les caractéristiques morphologiques très proches empêchent leur séparation lors du triage en usine (photos SNES).

Ces données montrent la bonne qualité des semences certifiées. Des tendances à l'augmentation dans certaines périodes peuvent s'expliquer par des difficultés de triage, par l'apparition de résistances vis-à-vis de certains désherbants, le retrait d'homologation de certains herbicides ou l'adoption de nouvelles pratiques culturales.

Ces données peuvent être valorisées dans le choix d'orientations des programmes d'étude sur la qualité des semences et dans le cadre de la biovigilance et de la gestion des territoires.

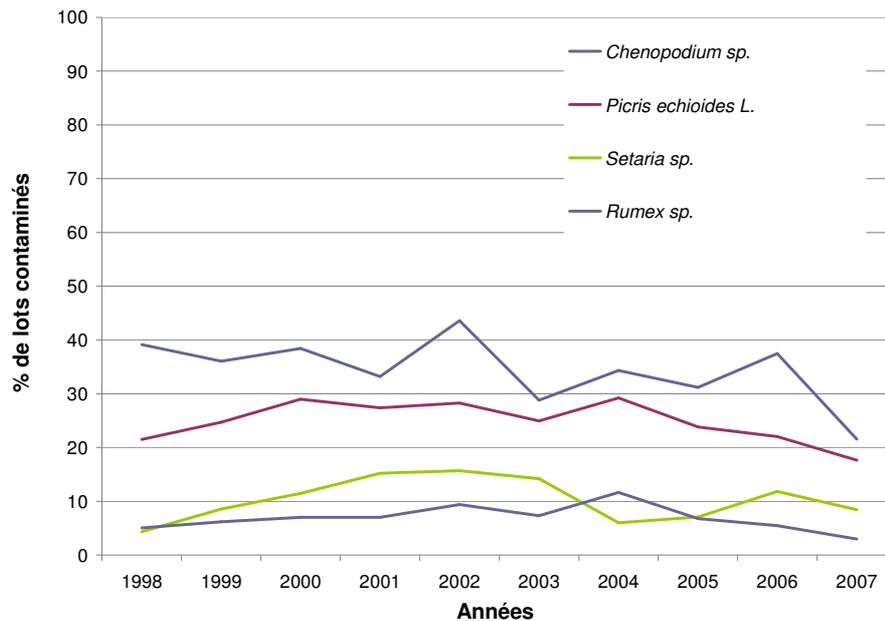


Figure 13 : Fréquence de détection des principales espèces étrangères dans les lots de *Medicago sativa* L.

### Mise au point de nouvelles méthodes d'analyses pour le contrôle de la présence d'espèces étrangères : la vision artificielle

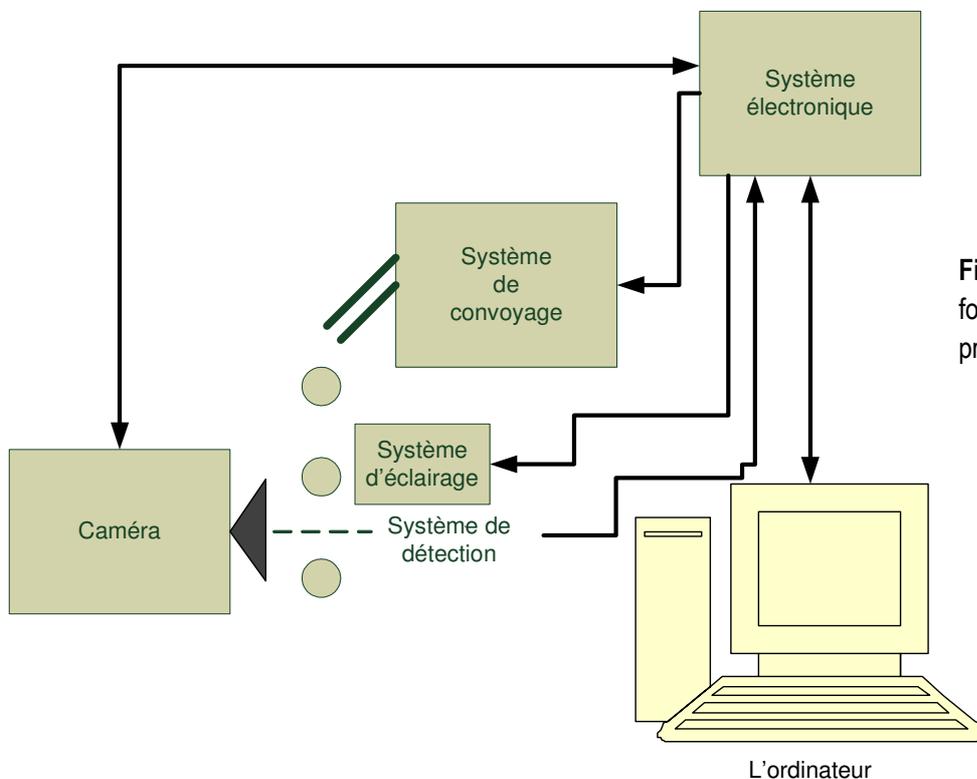
L'analyse des lots de semences selon les méthodes internationales standardisées relève de la perception humaine et de l'expertise des analystes. De nos jours, de nombreux systèmes basés sur la vision artificielle ont été développés et font l'objet de recherche pour l'amélioration de la qualité des lots ou leurs contrôles. Dans ces domaines, peuvent être cités les travaux réalisés par Granitto *et al.* (2002) et la thèse de Y. Chtioui (1997) pour la caractérisation et l'identification des semences d'adventices, Majumdar et Jayas (2000) pour le contrôle des lots de céréales et les travaux de Daoust *et al.* (2005) sur l'intégration d'un système d'identification pour la réalisation des analyses de contrôle.

Ce type de recherche nécessite l'utilisation de compétences pluridisciplinaires issues de la biologie, de la chimométrie, du traitement de l'image, de la physique et de l'électronique. L'activité de recherche méthodologique de la SNES s'inscrit dans ce cadre. Cette activité implique une collaboration avec des unités de recherches spécialisées dans ces différents domaines. La région Pays de la Loire par le biais des deux contrats de plan état région de 1994-1999 et de 2000-2006 (thème VISIOSEM) a permis de créer une collaboration entre unités de recherches: le Laboratoire d'Instrumentation des Systèmes Automatisés de l'université d'Angers, le laboratoire de Chimométrie Sensométrie de l'ENITIAA de Nantes, le centre de recherche et d'étude de l'Ecole Supérieure d'Electronique de l'Ouest, le secteur recherche de la Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs des Semences et le laboratoire de technologie des semences de la société Vilmorin.

Les semences sèches présentent plusieurs particularités lorsqu'il s'agit de les soumettre à des analyses automatisées. Elles présentent d'abord une grande variabilité naturelle en termes de morphologie, de couleur et de texture. Elles font l'objet d'une grande attention en termes de qualité et de conditionnement. Elles sont soumises à une réglementation très précise quant à leur certification et à leur commercialisation.

Il est attendu, à leur sujet, que les techniques nouvelles offrent des clichés de qualité et fournissent de quoi développer des méthodes statistiques issues de la chimométrie qui permettront d'identifier, de comparer et de reclasser les semences.

Cette recherche a conduit à la réalisation d'un prototype automatisé d'acquisition d'images de semences. Ce prototype utilise un principe de chute libre afin d'acquérir des images de semences à très haute cadence.



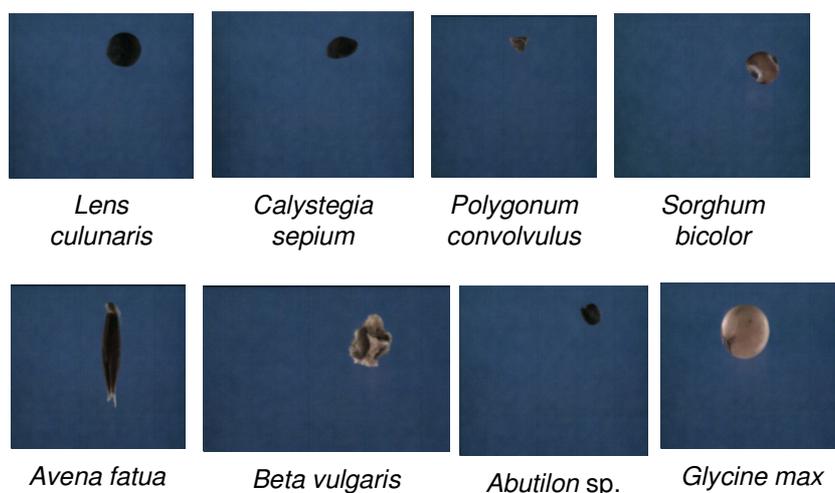
**Figure 14 :** Schéma de fonctionnement du prototype

Dans le prototype développé, la présence d'une semence en face de la caméra déclenche une prise d'image associée à un flash d'une durée de 80  $\mu$ s. Cette durée permet d'éviter le flou issu du mouvement de la semence en chute. Le système est en cours de validation sur tournesol, espèce pour laquelle, au vu de la réglementation, l'identification de toutes semences d'espèces étrangères est nécessaire. Pour deux espèces particulières (*Cuscuta* sp. et *Avena fatua* L.), une reconnaissance à 100% est indispensable, compte tenu de la norme de certification qui est de zéro semence dans un échantillon de 1kg (environ 25 000 semences). L'identification des cuscutes par le système actuel n'est pas réalisable en raison des contraintes techniques du prototype. Un simple tamisage préventif permet de séparer la fraction de l'échantillon contenant des semences de morphologie similaire à l'espèce cuscute.

A partir de ces différentes contraintes, une base d'images d'espèces les plus fréquemment présentes dans les lots de tournesol a été créée. Le tableau 2 présente le nombre d'images acquises pour chaque espèce.

Espèces	Abreviation	Nbre d'images	Espèces	Abreviation	Nbre d'images
<i>Avena fatua</i>	Af	217	<i>Secale cereale</i>	Sc	343
<i>Beta vulgaris</i>	Bv	226	<i>Sorghum bicolor</i>	Sb	217
<i>Abutilon</i> sp.	Ab	218	Achene d' <i>Helianthus annuus</i>	aHa	430
<i>Glycine max</i>	Gm	208	<i>Triticum aestivum</i>	Ta	461
<i>Lens culinaris</i>	Lc	209	<i>Xanthium</i> sp.	Xs	271
<i>Calystegia sepium</i>	Cs	207	x <i>Triticosecale</i>	xT	291
<i>Zea mays</i>	Zm	231	Semence d' <i>Helianthus annuus</i>	sHa	582
<i>Hordeum vulgare</i>	Hv	214	Graine endommagée d' <i>Helianthus annuus</i>	dHa	257
<i>Pisum sativum</i>	Ps	216	Sclérote de <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	ScS	369
<i>Polygonum convolvulus</i>	Pc	226			
Nombre total d'images acquises		5393			

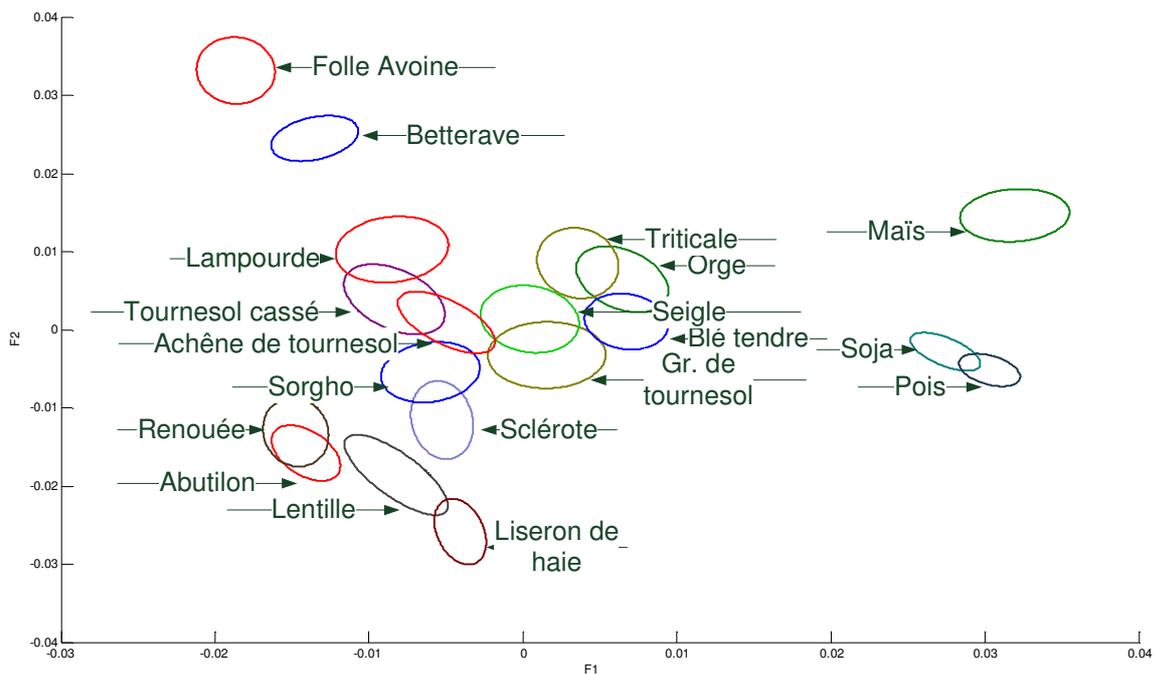
**Tableau 2 :** Nombre d'images acquises par groupe avec le système automatisé.



**Figure 15 :** Exemples d'images de semences acquises avec le prototype

A partir de cette base, des méthodes d'analyse d'image automatisées ont permis l'extraction de 116 paramètres, comprenant des paramètres morphologiques, de couleur et de texture, définis dans les articles de Majumdar et Jayas (2000).

Ces paramètres permettent de caractériser les différentes espèces et servent à l'apprentissage et au test des algorithmes de reconnaissance de forme couramment utilisés dans ce domaine. Ils résument chaque semence par des coordonnées utilisées pour le calcul de la distance minimale entre les différentes espèces acquises, ce qui permet leur identification. La figure 9 est une représentation de ces distances issue d'une combinaison linéaire des coordonnées extraites. Elle permet de représenter en 2 D les différentes espèces les unes par rapport aux autres et résume également le comportement des algorithmes de reconnaissance de forme appliqués.



**Figure 16 :** Carte de représentation de la dispersion des espèces selon les deux principaux axes d'une analyse discriminante factorielle.

Afin de tester les algorithmes de reconnaissance de forme (analyse discriminante linéaire ou LDA, analyse discriminante quadratique ou QDA), deux jeux de données ont été créés : un premier jeu de 1792 images pour réaliser l'apprentissage, le second de 3601 images pour les tester.

De manière générale, le système a permis d'obtenir une précision de reconnaissance entre 86 % avec LDA et 96 % avec QDA. Après analyse des résultats, il est apparu qu'il était difficile au système de reconnaître des semences présentant des défauts ou des orientations variables lors de leur prise d'image.

Dans le cadre de l'utilisation préconisée du prototype, le résultat obtenu nous permet néanmoins de séparer une fraction conséquente de l'échantillon contenant exclusivement des semences de tournesol. Afin de répondre totalement aux besoins de la certification, l'intervention d'un analyste expérimenté est donc nécessaire à ce stade. Une possibilité, actuellement en cours d'étude, est de réaliser un nouveau système capable de prendre plusieurs vues de la même semence grâce à l'utilisation de plusieurs caméras. Ceci devrait permettre d'augmenter la précision de reconnaissance et de faire évoluer les objectifs de la recherche vers un système de tri totalement autonome et également vers un système de phénotypage des semences à très haut débit.

## Références bibliographiques

- Binoa R.J., Aartse J.W., van der Burg W.J., 1993. Non-destructive X-ray analysis of *Arabidopsis* embryo mutants. *Seed Science Research*, 3, 167-170.
- Chtioui Y., 1997. Reconnaissance automatique des semences par vision artificielle basée sur des approches statistiques et connexionnistes. Thèse, IRESTE.
- Daoust T., Fujimura K., McDonald M.B., Bennett M.A., 2005. A computer based system for seed identification. *Seed Technology*, 27, 190-202.
- Dell'Aquila A., 2007. Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting. *Seed Sci. & Technol.* 35, 519-538.

- GNIS, 2007. Règlements techniques de la production, du contrôle et de la certification des semences. Edition 2007.
- Goodman R.C., Jacobs D.F.; Karrfalt R.P., 2006. Using X-Ray image analysis to assess the viability of northern red oak acorns: implications for seed handlers. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations – 2005, 143-146.
- Granitto Pablo M.P.F.V. Ceccatto H.A., 2003. Automatic identification of weed seeds. ASAI.
- ISTA, 2008. International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, Edition 2008.
- Janson J.P., Deneufbourg F., 2005. Maîtrise des adventices en production de semences de graminées fourragères : appréciation du risque et mesure des conséquences d'un salissement en vulpin dans du ray-grass anglais porte-graine. Les 3èmes Rencontres du Végétal, Angers, 17 et 18 novembre 2005, Recueil des Communications. p. 87-88.
- Le Bouanec B., Léchappé J., 2006. Les semences : évolution au cours des 50 dernières années. C.R. Acad. Agric. Fr., 92, 21-41.
- Majumdar J.D.S, Jayas D., 2000. Classification of cereal grains using machine vision. I. Morphological models. American Society of Agricultural Engineers 43, 1669–1675
- Majumdar J.D.S, Jayas D., 2000. Classification of cereal grains using machine vision. II. Color models. American Society of Agricultural Engineers 43, 1677–1680
- Majumdar J.D.S, Jayas D., 2000. Classification of cereal grains using machine vision. III. Texture models. American Society of Agricultural Engineers 43, 1681–1687
- Majumdar J.D.S, Jayas D., 2000. Classification of cereal grains using machine vision. IV. Combined morphology. American Society of Agricultural Engineers 43, 1689–1694
- Mannino M.R., Deneufbourg F., de Goyon B., Léchappé J., 2004. Evolution de la flore adventice observée au cours des analyses de contrôle de la qualité des semences en laboratoire. Les 2èmes Rencontres du Végétal, Angers, 18 et 19 novembre 2004, Recueil des Communications. p. 160-162.
- Micó M., Labrada A., Calderón S., 1999. Use of X-ray analysis in studies of quality of seeds of some species of agricultural and forestry interest. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 240, 471-474.
- Muracciole V., Plainchault P., Bertrand D., Mannino M.R., 2007. Development of an automated device for sorting seeds - application on sunflower seeds. ICINCO-RA (1) 2007: 311-318
- Talukder A., Cassasent D., Lee H.W., Keagy P.M., Schatzki T.F., 1998. A new feature extraction method for classification of Agricultural Products from X-ray images. SPIE Conference on Precision Agriculture and Biological Quality, Boston Massachusetts, November 1998.

## **Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide permettent-elles de réduire l'usage des pesticides ? Le cas du soja et du maïs aux Etats-Unis**

**S. Bonny**

INRA, UMR Economie publique INRA-AgroParisTech, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : bonny@grignon.inra.fr

### **Résumé :**

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide (TH), actuellement largement prédominantes parmi les OGM, ont fait l'objet de nombreuses critiques notamment en raison de leur emploi concomitant d'herbicides. Mais celui-ci est-il similaire, plus ou moins élevé qu'en cultures conventionnelles ? L'article présente en premier lieu l'importance des cultures transgéniques TH dans le monde ainsi que dans les essais au champ aux Etats-Unis. Puis à partir du cas du soja tolérant au glyphosate, il examine les facteurs d'adoption de cette culture aux Etats-Unis où elle est très largement implantée, les avantages et les inconvénients au niveau agro-économique. Dans un troisième temps on étudie l'emploi des herbicides sur deux cultures transgéniques par comparaison aux conventionnelles, le soja et le maïs, ainsi que l'évolution des consommations d'herbicides sur l'ensemble de la culture au fil du temps après avoir signalé les problèmes de sources et de méthodes rencontrés. Dans le cas du soja, la culture transgénique consomme un peu plus d'herbicides que le soja conventionnel, mais c'est l'inverse pour le maïs TH qui emploie moins d'herbicides que le conventionnel. Cependant d'autres facteurs que l'utilisation d'une variété transgénique entrent en jeu, notamment les évolutions de prix des différents herbicides et les changements concomitants des techniques de culture. En dernier lieu on aborde les incidences environnementales de l'adoption des cultures transgéniques. On note une diminution de la toxicité des herbicides utilisés pour le soja et le maïs transgénique. Mais aussi l'apparition d'adventices tolérantes au glyphosate vu la très forte utilisation de ce dernier en remplacement des herbicides utilisés naguère. La conclusion souligne que ce qu'on qualifie d'impacts des OGM relève en fait largement des impacts du système économique dominant.

**Mots-clés:** OGM, culture transgénique, herbicide, pesticide, désherbage, tolérance à un herbicide, glyphosate, adventice, soja, maïs, environnement, résistance aux herbicides, économie agricole, Etats-Unis.

**Abstract: Do transgenic herbicide tolerant crops make it possible to reduce the use of pesticides? The case of soybean and corn in the USA.**

Transgenic herbicide tolerant (HT) crops, the most prevalent of the GM crops used throughout the world, have been strongly criticized, in particular because of the use of herbicides associated with them. However, to what extent is the use of herbicides in the case of HT crops similar to the case of conventional crops? This paper presents the importance of HT transgenic crops in the world and then more specifically in field trials in the USA. Secondly, based on the case of glyphosate-tolerant soybean, we examine the factors of adoption of this crop in the USA, where it is widely cultivated, as well as its advantages and disadvantages at the agro-economic level. Thirdly, the problems involving statistical sources and methods are explained. The use of herbicides in the field is studied in the case of two transgenic crops, soybean and corn, compared to the use of herbicides in the case of conventional crops. We also delve into changes in herbicide use in terms of the entire crop over time. In the case of soybean, farmers use a little more herbicide than in the case of conventional soybeans, but the opposite is true for HT corn for which farmers use less herbicide than for conventional corn. However, other factors than the use of a transgenic variety come into play, notably changes in the prices of various

herbicides and concurrent changes in cultural practices. Finally, we address the environmental impact of the adoption of transgenic crops. There has been a decrease in the toxicity of herbicides used for soybean and corn, but as well the emergence of weeds tolerant to glyphosate because of the high use of the latter replacing previously used herbicides. The conclusion emphasizes that what is qualified as "the impacts of GMOs" is in fact largely the result of the overall effects of the economic system: the governance of innovation is more at stake than the innovation itself.

**Keywords:** GMO, transgenic crop, herbicide, pesticide, weeding, herbicide tolerance, glyphosate, weed, soybean, corn (maize), environment, herbicide resistance, agricultural economics, USA.

**Abréviations utilisées:**

GM: génétiquement modifié ; TH : tolérant à un herbicide ; Bt: variété résistante à certains insectes grâce à la toxine Bt.

USDA NASS : Service National d'Enquêtes Statistiques du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis.

USDA ERS: Service de recherche économique du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis.

APHIS : Animal and Plant Health Inspection Service (du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis)

---

## Introduction

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide représentent en 2008 la majeure partie des surfaces en OGM cultivées sur la planète. Sur les 114 millions d'ha d'OGM en 2007, 82% sont tolérants à un herbicide, ce caractère pouvant être seul ou associé à un ou deux autres comme des résistances à certains insectes. Cela témoigne du succès rencontré par ce nouveau caractère qui offre une nouvelle méthode de désherbage. Mais cela paraît aussi surprenant en particulier en Europe car ce caractère transgénique y est souvent jugé comme d'un intérêt faible ou nul. Cet OGM y fait en effet l'objet de vives critiques de la part de certains acteurs car il est considéré comme n'ayant d'intérêt que pour les firmes qui le commercialisent. Au contraire d'autres sources signalent les avantages pour les agriculteurs de cette méthode, d'où sa forte adoption, et l'économie en herbicides qu'elle permet. Aussi semble-t-il utile de mieux analyser les facteurs qui expliquent la diffusion rapide de ces plantes, leurs divers impacts et leurs enjeux. Quels intérêts et inconvénients présente cette nouvelle méthode de désherbage ? Après un rappel de son importance, on s'appuiera notamment sur une étude approfondie du cas américain pour esquisser un bilan de deux cultures transgéniques tolérantes à un herbicide, le soja et le maïs. On analysera les facteurs expliquant la forte adoption du soja tolérant au glyphosate. Puis, on cherchera à étudier si cette nouvelle méthode entraîne une augmentation de l'emploi des herbicides ou au contraire une réduction comme ce sujet fait l'objet de vives controverses. En dernier lieu, on analysera l'impact environnemental de ce type de cultures transgéniques.

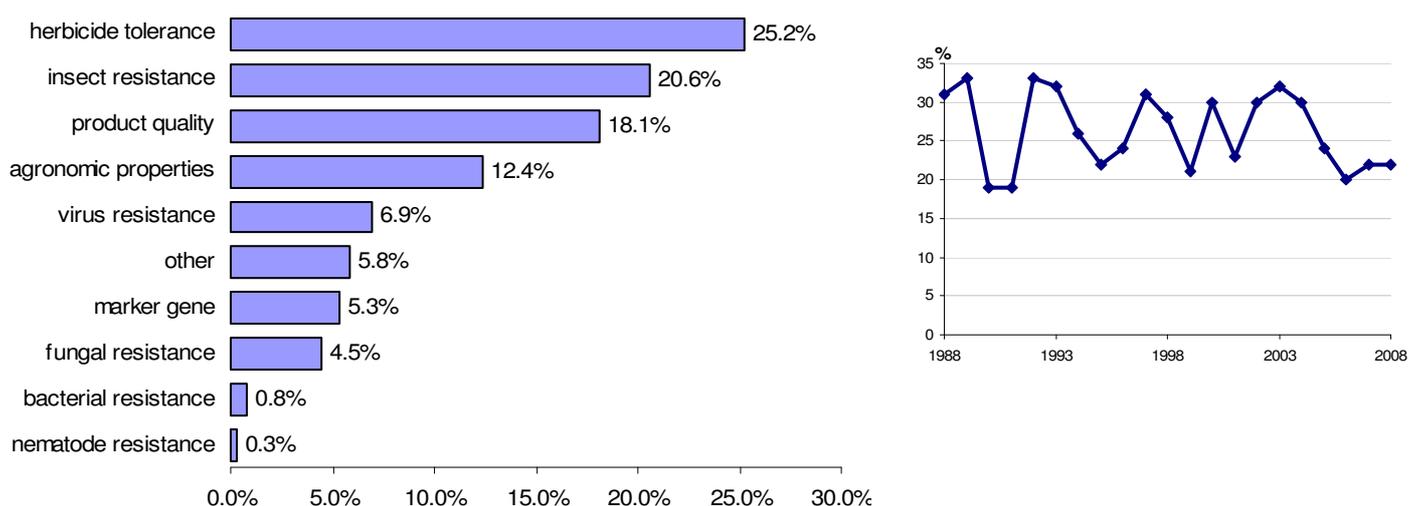
### I. L'importance des cultures transgéniques tolérantes à un herbicide :

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide représentaient, en 2007, 82% des surfaces en OGM, et environ 6% de l'ensemble des terres cultivées. Cette dernière proportion est modeste notamment parce que le nombre d'espèces transgéniques présentant ce nouveau caractère – comme le nombre d'espèces transgéniques déjà cultivées en général – est limité : soja, maïs, coton, colza. Mais d'autres plantes transgéniques tolérantes à un herbicide seront certainement commercialisées dans les prochaines années. En tout cas, il y en a de nombreuses qui ont été testées au champ aux USA, principal pays en matière de développement des OGM (la moitié des cultures transgéniques y sont cultivées). Plusieurs facteurs expliquent cette importance du caractère de tolérance à un herbicide dans les cultures en place et les essais :

- C'est un caractère monogénique relativement facile à isoler et à introduire par transgénèse comparativement à d'autres caractères impliquant de nombreux gènes. Il fut présent dès les premiers essais au champ à la fin des années 1980.
- Via la vente du glyphosate il assurait aux firmes comme Monsanto un revenu pendant que la firme développait ses recherches en biotechnologies et génomique. En effet, Monsanto a transformé sa structure passant d'une entreprise purement chimique à une entreprise de biotechnologie et de semences, ce qui nécessitait des recherches et des investissements dont la rentabilité ne peut apparaître qu'au bout d'un temps parfois long. Des profits sur le glyphosate étaient essentiels pour Monsanto tant que l'autre secteur (les semences et la génomique) était encore dans les premiers stades de son développement.
- Ces cultures tolérantes à un herbicide ont été largement adoptées par les agriculteurs car elles permettaient notamment une simplification du désherbage et une réduction du temps de travail pour cette opération. Par ailleurs, cela s'associait bien à d'autres techniques en progression, en particulier les techniques de conservation des sols. En outre les OGM ont bénéficié aux USA d'un contexte favorable à leur développement.

Cette importance des cultures transgéniques TH pourrait être amenée à changer assez rapidement si l'on notait dans les essais aux champs ou parmi les plantes transgéniques proches de la commercialisation la présence de multiples nouveaux caractères différents. Or, ceci ressort peu des essais au champ. Si l'on étudie ceux qui ont lieu aux USA où ils sont de loin les plus nombreux, on observe que les plantes TH sont les premières en importance en termes d'essais réalisés et que leur proportion diminue très faiblement au cours du temps (Figure 1). Il est donc probable que seront encore commercialisées d'autres plantes TH, ou bien les mêmes plantes mais tolérantes à un autre herbicide. C'est bien ce que l'on observe dans le pipeline des grandes firmes même si de nouveaux caractères y sont également présents.

**Figure 1** : Importance aux USA des essais au champ de plantes transgéniques exprimant un caractère de tolérance à un herbicide, 1988-2008 (environ 19060 essais au champ\*) (d'après la base APHIS, 1 janvier 2009)



\*certains essais concernent 2 traits ou plus. Les pourcentages sont calculés en proportion de tous les traits testés, non du nombre d'essais

a/ ensemble de tous les essais au champ de 1988 à 2008

b/ évolution de la tolérance à un herbicide en % du nombre total de traits testés chaque année de 1988 à 2008.

Il faut bien noter que toutes les variétés tolérantes à un herbicide ne sont pas transgéniques. Il en existe d'autres issues de mutagenèse ou de méthodes conventionnelles d'amélioration, mais elles ont suscité

à la fois moins d'intérêt car leur efficacité n'est pas parfaite et moins de controverse comme elles ne sont pas des OGM. Par ailleurs elles sont assez peu employées en termes de surfaces. On peut ainsi citer :

- la tolérance aux sulfonylurées (système "STS" de DuPont)
- la tolérance à l'imidazolinone (technologie "Clearfield" de BASF)
- la tolérance au cycloxydime ("Stratos ultra"), technologie "Duo System" de BASF.

Par ailleurs, on considérera ici surtout le cas de la tolérance au glyphosate introduite par transgénèse, sans analyser les plantes transgéniques tolérantes au glufosinate ("Basta") car elles sont actuellement peu répandues, même si certaines sont autorisées depuis plus de 10 ans et si d'autres devraient être commercialisées dans l'avenir.

## II. Le bilan agro-économique des cultures transgéniques tolérantes à un herbicide: le cas du soja tolérant au glyphosate aux USA

Le choix de cet exemple s'explique par le fait que c'est actuellement et depuis 1996 la culture transgénique la plus répandue. D'une part, le soja transgénique est la première culture transgénique présente dans le monde : elle représentait 51 % de l'ensemble des surfaces en OGM en 2007. D'autre part en 2007 64% du soja cultivé dans le monde était transgénique et ce pourcentage se montait à 98 % en Argentine, 92 % aux USA et 64 % au Brésil (James, 2007). Les surfaces en soja GM aux USA représentent 27,7 M ha en 2008, soit environ la moitié de la surface totale de la France.

Quels facteurs expliquent ce très fort taux d'adoption aux USA ? De nombreux aspects jouent. En effet, le développement d'une innovation en agriculture dépend de facteurs économiques, sociaux, agronomiques, pédoclimatiques, institutionnels et culturels. D'une part, le contexte américain était propice avec un accueil assez favorable des biotechnologies. D'autre part, les farmers ont trouvé des avantages à utiliser le soja TH qui en ont compensé les inconvénients.

### 2.1 Des avantages agro-économiques qui compensent les inconvénients du soja TH

A l'échelle des exploitations, les facteurs de développement rapide du soja TH sont multiples outre l'aspect économique traité plus loin. Le Tableau 1 donne une vue d'ensemble de ses avantages et inconvénients qui doit être affinée dans chaque situation. L'un des premiers intérêts du soja TH pour les agriculteurs provient notamment du fait **qu'il simplifie, du moins à court terme, le désherbage**. Auparavant les agriculteurs utilisaient plusieurs herbicides et diverses adventices restaient difficiles à contrôler. La culture transgénique permet une **gestion plus facile du désherbage** car un seul produit peut suffire. Par ailleurs, la période où l'on peut traiter est un peu plus longue, ce qui entraîne une plus **grande flexibilité du travail** et diminue le risque d'intervenir trop tard si les conditions météorologiques empêchent de traiter à la période adéquate. De plus, les herbicides utilisés naguère étaient pour certains assez rémanents et pouvaient affecter les cultures suivantes et même le soja lui-même (UIUC, 1999 ; Carpenter, 2001 ; Carpenter et Gianessi, 1999-2002 ; Bullock et Nitsi, 2001 ; Nelson, 2001 ; Gianessi *et al.*, 2002 ; Alexander, 2006 ; Gianessi, 2008).

Pour les farmers, plusieurs aspects agro-économiques confèrent de l'intérêt au soja HT. Ce sont notamment :

- **la gestion du désherbage relativement plus facile et la simplification du traitement herbicide** libèrent du temps pour d'autres activités. Cet aspect difficilement chiffrable est important car le métier d'agriculteur comporte de multiples tâches, parfois en concurrence lors des pointes de travail, *a fortiori* en cas de pluriactivité. Or celle-ci est fréquente dans tous les

pays, même aux USA. En tout cas le temps libéré a souvent une valeur importante pour les agriculteurs (Fernandez-Cornejo *et al.*, 2005 ; Gardner et Nelson 2007 ; Piggott et Marra, 2008).

- **la diminution du risque d'un désherbage raté** : avec le soja TH, la période où l'on peut épandre l'herbicide est un peu plus longue, ce qui est intéressant en cas d'intempéries ou de grandes surfaces. Mais un traitement trop tardif peut nuire au rendement (Knezevic *et al.*, 2003 ; Owen, 2007).
- **la culture de soja TH va souvent de pair avec d'autres techniques** comme une culture en rangs plus serrés et les techniques de "conservation des sols" (TCS) (Barnes, 2000 ; Marra *et al.*, 2004 ; Cerdeira et Duke, 2006). Ces dernières se développent en raison de divers programmes pour limiter l'érosion et préserver les sols : en 2004, 61 % du soja était cultivé ainsi (CTIC, 2004). Divers travaux soulignent la bonne association entre les TCS et les cultures TH qui permettent de résoudre les problèmes d'adventices que l'on rencontrait naguère avec ces techniques (ASA, 2001 ; Fawcett et Towery, 2002 ; Sanvido *et al.*, 2007). De fait, les enquêtes de l'USDA montrent qu'en 2002 la proportion de TCS était plus élevée (67%) avec les variétés GM qu'avec les variétés non GM de soja (51%).

**Tableau 1** : Les avantages et inconvénients du soja tolérant au glyphosate pour les agriculteurs

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<p><b>1. Agro-économiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- gestion du désherbage souvent plus facile (un seul produit)</li> <li>- plus grande flexibilité du travail (on peut traiter pendant une période un peu plus longue) ce qui facilite les autres travaux.</li> <li>- marge assez voisine ou très légèrement plus élevée que celle du soja conventionnel comme le coût des traitements herbicides est réduit.</li> <li>- moindre risque économique de désherbage raté.</li> <li>- rotation des cultures plus faciles : le glyphosate non rémanent ne nuit pas à la culture suivante contrairement à d'autres herbicides</li> <li>- diminution assez fréquente du nombre de traitements herbicides.</li> <li>- réduction du temps de travail et d'utilisation du matériel pour les traitements en général.</li> <li>- bonne association avec les TCS (techniques de conservation des sols).</li> </ul> <p><b>2. Environnementaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le glyphosate étant peu toxique induit une diminution de l'impact sur l'environnement des herbicides employés par comparaison au soja conventionnel.</li> <li>- légère réduction du nombre de passages de tracteurs ou épandeurs.</li> <li>- souvent associé aux TCS qui réduisent l'érosion du sol et ont un impact environnemental positif.</li> </ul> <p><b>3. Sécurité sanitaire</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le glyphosate remplace d'autres herbicides souvent plus toxiques, d'où réduction des risques</li> </ul>	<p><b>1. Agro-économiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- surcoût de la semence en raison des "technology fees".</li> <li>- plus grande dépendance envers les firmes d'agrofourniture si un contrat d'engagement stipule de ne pas réutiliser une part de la récolte comme semence.</li> <li>- pour le soja très faible risque de polliniser des cultures de soja voisines, mais nécessité croissante de séparer les diverses récoltes pour éviter le mélange de graines.</li> <li>- plus grande attention nécessaire dans la chaîne de fabrication des semences afin d'éviter la présence accidentelle de graines GM dans un sac de semences certifié non OGM.</li> <li>- risque de difficultés à maîtriser les repousses de la culture précédente si elle était tolérante au même herbicide.</li> <li>- augmentation de la suspicion de certains consommateurs envers les produits agricoles, d'où risque de difficulté parfois pour vendre ou exporter.</li> </ul> <p><b>2. Environnementaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la croissance de l'emploi du glyphosate peut induire le développement d'adventices résistantes à cet herbicide. Dans ce cas d'autres herbicides souvent plus toxiques devront être employés en remplacement.</li> </ul> <p><b>3. Sécurité sanitaire</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- risque potentiel d'accumulation de métabolites de dégradation du glyphosate et de ses adjuvants dans la plante ?</li> </ul>

**Mais l'engagement par contrat de ne pas réutiliser sa semence la campagne suivante renchérit le coût de cet intrant.** Aux USA en 1998, 15 à 20% des surfaces de soja étaient ensemencées par des graines provenant de la récolte précédente de l'agriculteur, et dans d'autres pays comme l'Argentine (gros producteur de soja), cette proportion atteignait 25 à 35% et était augmentée par les achats à d'autres agriculteurs hors circuits commerciaux officiels (US-GAO, 2000). Cependant les firmes ont tenu compte de cet élément dans leur politique de prix des semences transgéniques : ainsi pour le soja TH ces dernières étaient vendues beaucoup moins cher en 1998 en Argentine qu'aux États-Unis. Pour les farmers, l'une des principales questions en la matière est l'évolution du prix du "technology fee". Le témoignage d'un farmer interrogé sur la question des contrats donne un éclairage sur leur point de vue.

*« Les agriculteurs pour la plupart admettent les contrats demandés par Monsanto. Ils voient les bénéfices du programme et le fait que Monsanto a besoin d'un retour sur investissement. Ils n'aiment certes pas le fait de ne pas pouvoir ressemer une part de leur récolte, mais les agriculteurs achetaient de plus en plus de nouvelles semences chaque année avant que la nouvelle technologie RR devienne disponible. L'une des raisons de ne pas ressemer leurs semences est l'amélioration rapide dans les variétés RR chaque année. Non seulement conserver sa semence est illégal, mais vous avez besoin d'avoir la génétique la plus performante sur l'exploitation dès que possible. Un boisseau par acre de gain de rendement rembourse le coût de la nouvelle semence. Mais il pourrait y avoir plus de résistance chez les agriculteurs aujourd'hui envers Monsanto à cause de la hausse des "technology fees" » (agriculteur de l'Illinois, communication personnelle).*

**Les flux de gènes entre des cultures voisines de soja conventionnel et de soja GM** ne posent pas de problème ici alors qu'en Europe ils font l'objet de vives préoccupations pour la plupart des OGM. En effet le soja, plante à 99 % autogame, induit fort peu de risques de pollinisation fortuite de cultures voisines non OGM de même espèce comme cela est le cas pour le colza et le maïs. Mais la vigilance s'impose en divers domaines, en particulier à l'amont lors de la chaîne de fabrication des semences, et à l'aval pour éviter le mélange accidentel de graines GM avec des graines certifiées "GM free" que choisit un petit nombre d'agriculteurs pour vendre sur des marchés spécifiques avec une prime.

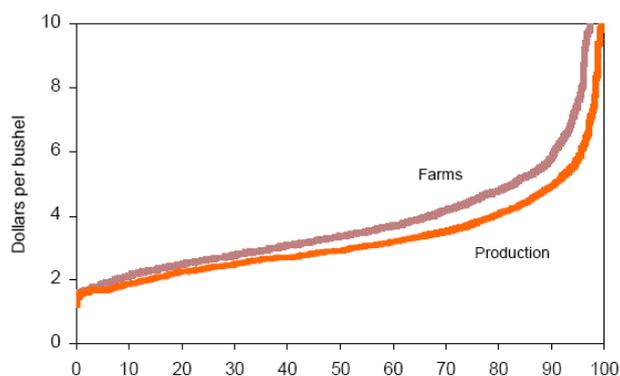
## *2.2 Un intérêt économique variable, assez souvent positif, du soja transgénique*

L'écart de marge entre le soja TH et le conventionnel est difficile à quantifier car les coûts de production du soja varient fortement selon les exploitations (Foreman et Livezey, 2002) (Figure 2). De plus les prix des semences, des herbicides et du soja ont varié au cours des dernières années (Bullock et Nitsi, 2001 ; Ash, 2001). En général pour le soja TH, le surcoût de la semence transgénique est compensé par une moindre dépense en désherbants due à un prix un peu plus bas du glyphosate et à un nombre total de traitements moins élevé (Sankula *et al.*, 2005). Aussi les coûts de production du soja GM sont en général légèrement plus faibles et les marges légèrement plus élevées. Mais l'écart entre soja TH et conventionnel dépend des adventices présentes et des herbicides (ou autres moyens de contrôle) utilisés : il existe une certaine gamme en conventionnel comme en transgénique, Monsanto proposant plusieurs formulations selon le type d'adjuvants et la concentration, sans oublier les génériques du glyphosate. De la sorte, le poste "semences + herbicides" est un peu plus faible en soja TH pour une part des surfaces, mais pas toujours. En tout cas, ce coût a diminué chez beaucoup d'agriculteurs entre 1996 et 2000, qu'ils utilisent des variétés transgéniques ou non. En effet, les firmes commercialisant des herbicides en ont diminué les prix dans la deuxième moitié des années 1990 pour tenter de lutter contre la concurrence des cultures TH (cf. Figure 6).

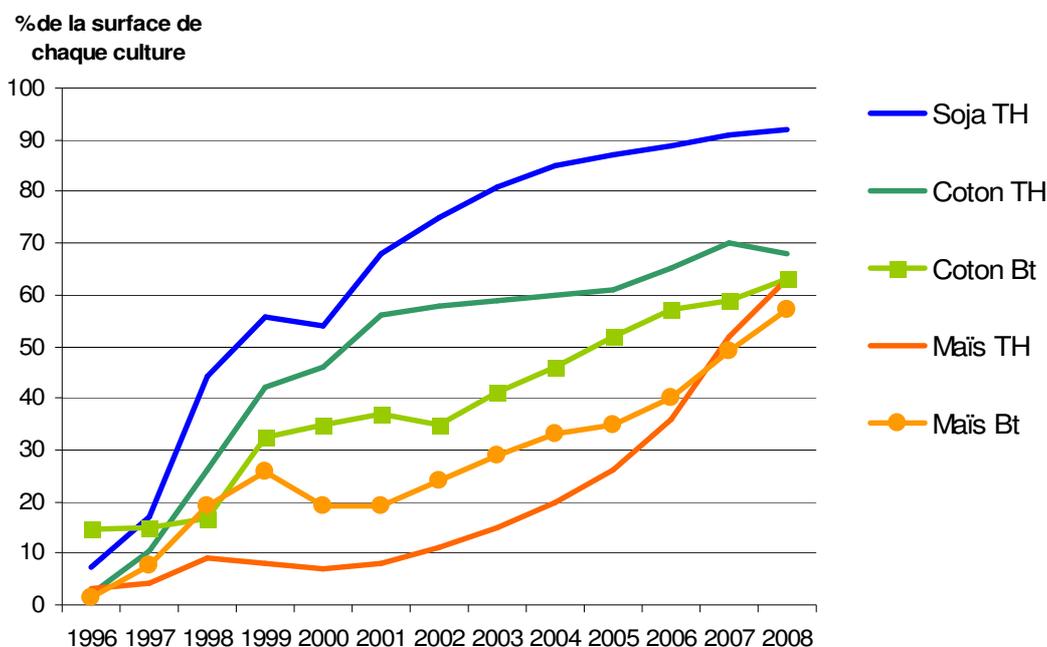
Pour étudier l'intérêt d'une technique, on cherche souvent à comparer les coûts de production ou la marge de la culture avec la nouvelle technique et en conventionnel. Cependant, cela présente des limites car la comparaison est très liée aux rapports de prix qui peuvent se modifier. Aussi est-il utile de la compléter par une analyse en termes de quantité de moyens de production employés. De plus, une

notion ancienne souvent oubliée doit être rappelée : il faut considérer l'exploitation comme un système et éviter d'étudier une production isolément. En particulier, établir le coût de production d'une culture indépendamment des autres productions possibles et de son interaction avec le fonctionnement de l'ensemble de l'exploitation peut donner une vue erronée car cela néglige divers coûts d'opportunité et les effets "système". Ainsi le soja TH peut avoir pour l'agriculteur des avantages supplémentaires : simplification du désherbage libérant du temps pour d'autres productions ou activités, association assez bonne avec les TCS d'où développement de celles-ci (effet de synergie), non rémanence de l'herbicide,... Enfin le calcul de rentabilité micro-économique néglige souvent les coûts externes environnementaux, économiques ou de plus long terme.

Ainsi, le soja TH présente divers intérêts agro-économiques pour les farmers, ce qui explique son adoption rapide. Aux USA, le maïs HT s'est diffusé plus lentement par comparaison d'une part parce que son intérêt était un peu moindre que celui du soja HT compte tenu des autres possibilités en désherbage, d'autre part à cause des impératifs de rotation (Figure 3). En effet, une succession maïs-soja tolérants tous deux au glyphosate risque de poser des problèmes pour le contrôle des éventuelles repousses de maïs dans le soja.



**Figure 2 :** Fréquence cumulée des coûts de production du soja (en \$ par boisseau) selon les exploitations en 1997. Source: Foreman, Livezey 2002, d'après l'enquête ARMS (Agricultural Resource Management Survey) 1997.



**Figure 3 :** Évolution de l'adoption des différentes cultures transgéniques aux USA. Pour chaque culture figure le pourcentage des surfaces en transgénique, ce qui induit un double compte pour les variétés ayant à la fois des caractères TH et Bt (cela explique que pour le coton et le maïs la somme des % soit supérieure à 100) (Source : USDA-ERS, 2008a).

### III- L'emploi des herbicides : des bilans variés selon les cultures transgéniques et les études considérées.

#### 3.1 Les questions de sources et de méthodes

L'évolution de l'emploi des pesticides avec les OGM est à voir au cas par cas car elle varie selon le type de caractère nouveau introduit, la plante considérée et le contexte pédoclimatique et socioéconomique. Avec une culture tolérante au glyphosate, les herbicides conventionnels usuels sont supprimés en très grande partie et le glyphosate se substitue à eux. Mais les herbicides conventionnels sont employés à des doses très variables par ha, les préconisations pouvant varier de 10 g/ha à 1,3 kg/ha selon la molécule ; de son côté, le glyphosate est souvent épandu à la dose d'environ 0,75 kg/ha. Ainsi, si par exemple 1,5 traitements de glyphosate remplacent 3 traitements conventionnels, le bilan en quantité en kg/ha sera fort variable selon les désherbants employés auparavant, mais cela n'aura pas vraiment de sens. Il est en effet nécessaire de pondérer le niveau d'emploi des herbicides par la prise en compte de leurs conditions d'utilisation et par des indicateurs de toxicité et d'écotoxicité si l'on veut pouvoir apprécier leurs impacts environnementaux et toxicologiques.

Divers travaux ont cherché à analyser l'évolution de l'emploi des herbicides avec les variétés TH. Mais cela reste fort difficile à appréhender car il existe très peu d'enquêtes détaillées accessibles qui permettent de comparer les désherbants utilisés en culture conventionnelle et en culture TH. De plus à supposer que cette comparaison soit possible, il faudrait vérifier qu'elle se fait « toutes choses égales par ailleurs », c'est-à-dire que les soles des cultures conventionnelles et transgéniques sont bien similaires. Autrement dit qu'il n'y a pas d'autre facteur source de différence de consommation que la nature de la culture (les farmers pouvant par exemple utiliser la culture transgénique là où l'infestation en adventices est la plus forte). Il faudrait dans l'idéal séparer les divers facteurs d'hétérogénéité avant d'établir les effets de l'usage de variétés transgéniques (Heimlich, 2000 ; Fernandez-Cornejo et McBride, 2002 ; Bonny et Sausse, 2004). En effet, il serait erroné de faire porter à la culture transgénique des économies ou des accroissements d'emploi de désherbants qui viennent d'autres facteurs concomitants

Pour analyser le changement dans l'emploi des herbicides avec l'adoption d'une culture transgénique comme le soja TH, il faut également disposer de données suffisamment fines et détaillées en la matière. Concrètement trois types de sources et de méthodes peuvent être mobilisées :

- aux USA, les services statistiques du ministère de l'agriculture (USDA-NASS) effectuent des enquêtes annuelles sur les consommations d'herbicides pour le soja, le maïs, le coton et d'autres productions. Mais les résultats sont fournis de façon globale pour l'ensemble des soles de chaque culture sans différencier l'emploi des herbicides sur les variétés transgéniques et conventionnelles. On ne peut donc pas comparer directement les consommations des deux types de variétés, mais seulement analyser l'évolution des consommations au cours du temps : comment l'emploi des herbicides a évolué au fur et à mesure que se développait la culture transgénique (passant de son absence à un pourcentage plus ou moins élevé de la sole). Des données sont disponibles jusqu'en 2006.
- on peut chercher à comparer cultures conventionnelles et transgéniques sur le critère de l'emploi d'herbicides aux USA à partir des sondages d'un cabinet de conseil DMRkynetec (auparavant Doanes Marketing Research) qui effectue des enquêtes marketing sur les exploitations américaines et dispose de données sur les consommations d'herbicides par culture d'un échantillon de plusieurs milliers d'exploitations de 1998 à 2008. Malheureusement, l'acquisition de ces données est extrêmement coûteuse et elles ne peuvent pas être publiées de façon détaillée.
- des données à dire d'experts qui comparent l'emploi des herbicides en cultures transgénique et conventionnelle en tenant compte de leur évolution au cours du temps peuvent aussi être

sollicitées. Le NCFAP, National Center for Food and Agricultural Policy, a publié divers travaux pour diverses années et cultures reposant sur cette méthode.

*Les trois types de sources ont des intérêts et limites ; dans le cas du soja et du maïs aux USA elles donnent des résultats légèrement différents ce qui n'est pas surprenant vu les erreurs d'échantillonnage. Présentons plus précisément ces données. En premier lieu, le service statistique du ministère de l'agriculture (USDA NASS) effectue des enquêtes par sondage chaque année auprès des agriculteurs pour les principales cultures afin d'évaluer l'utilisation de pesticides. Mais ces enquêtes établissent l'usage des produits de traitements de façon globale par culture sans séparer l'emploi sur une même culture GM et non GM. Toutefois, l'utilisation sur les deux types de variétés pourrait être évaluée pour de rares années où ont lieu des enquêtes plus approfondies de l'USDA, les enquêtes ARMS (Agricultural Resources Management Survey). Mais il faut pour cela avoir accès aux fichiers individuels détaillés de l'enquête, ce qui ne nous a pas été possible. On dispose seulement de résultats différenciés des cultures GM et non GM pour l'année 1997-98 où un dépouillement et une analyse détaillée ont été effectués par les services de l'USDA, mais cette année est déjà ancienne. L'évolution de l'emploi des herbicides liée à l'expansion des cultures tolérantes au glyphosate peut donc être seulement étudiée de façon globale sur l'ensemble de chaque culture, ce qui apporte déjà diverses indications. Ces enquêtes de l'USDA sur les herbicides utilisés sont des enquêtes par sondage qui concernent la plupart des Etats producteurs de soja, mais avec un nombre variable d'Etats selon les années. De ce fait, la surface de soja US représentée dans l'enquête varie selon les années de 80% à 96%, parfois exceptionnellement 70%. Pour éliminer ces variations, nous avons ramené les herbicides utilisés à la surface totale de soja incluse dans l'enquête chaque année, établissant ainsi des doses moyennes de désherbants par ha. Les valeurs peuvent être comparées d'une année à l'autre comme les Etats non enquêtés cultivent de faibles quantités et ont ainsi peu d'influence sur la moyenne. Cependant, vu les variations d'échantillonnage d'une année à l'autre, ces doses d'herbicides par ha global de culture GM et non GM doivent être considérées avec prudence : ce sont des évaluations approchées.*

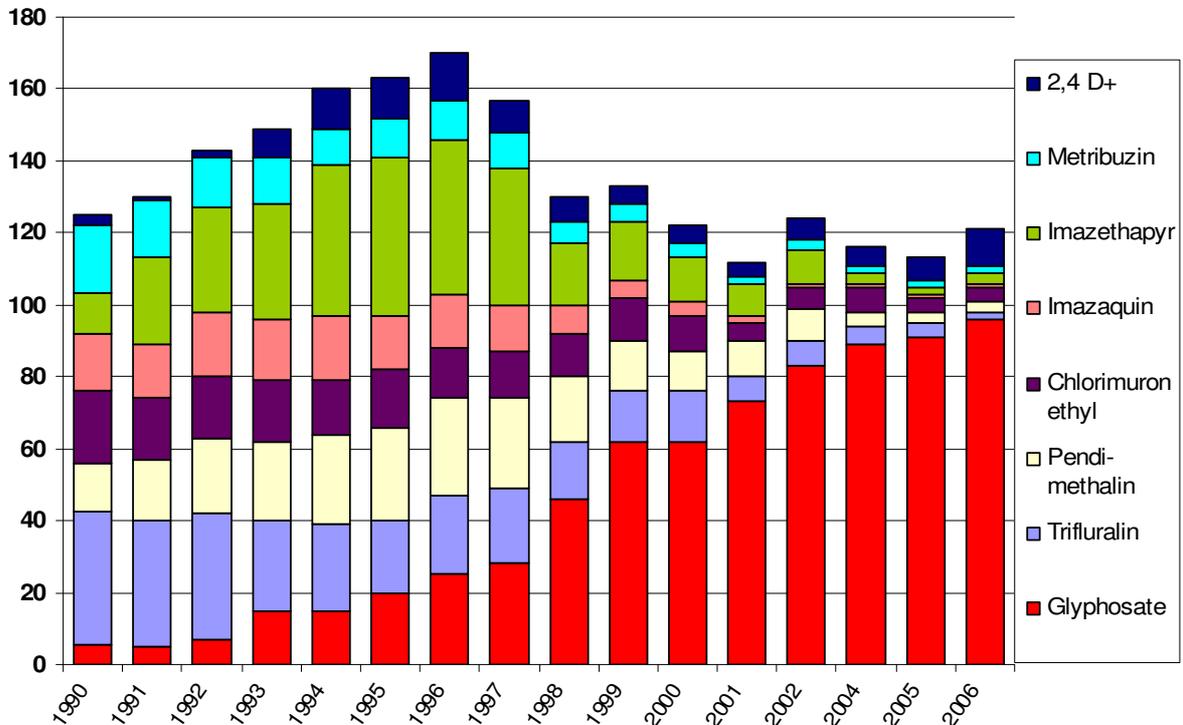
*Nous avons aussi utilisé les résultats des enquêtes accessibles de DMRkynetec qui offrent l'avantage de donner la consommation d'herbicide pour les variétés transgéniques et conventionnelles. Cependant, pour les années récentes, comme la proportion de culture conventionnelle est assez faible, l'erreur d'échantillonnage peut être assez importante pour cette dernière. Enfin, les enquêtes établies à dire d'experts donnent de leur côté des résultats assez approchés, qui peuvent être biaisés : ce sont surtout des ordres de grandeur et des outils de réflexion. Les cas du soja et du maïs tolérants au glyphosate sont pris ici comme exemple compte tenu de leur importance en surface aux USA et en tant que culture d'exportation.*

### *3.2 L'évolution de l'emploi des désherbants sur le soja tolérant à un herbicide : une croissance rapide du glyphosate remplaçant progressivement une grande part des herbicides antérieurs.*

L'analyse de l'évolution des traitements sur le soja de 1990 à 2006 à partir des enquêtes USDA NASS fait apparaître que la progression de la part des variétés transgéniques entraîne une substitution progressive du glyphosate à une large part des herbicides employés auparavant (Figure 4) (Kleter *et al.*, 2007). En particulier l'imazethapyr, le trifluralin, l'imazaquin, la pendiméthaline, le chlorimuron-ethyl, le metribuzin assez largement utilisés en 1995 le sont beaucoup moins en 2006. Ainsi, de 1995 à 2006, le pourcentage de surface de soja traité avec de l'imazethapyr a diminué de 44 à 3%, et le pourcentage traité avec de la pendiméthaline a baissé de 26 % à 3%.

Quelle a été l'évolution du nombre de traitements herbicides ? L'emploi de soja transgénique a souvent permis de réduire le nombre de traitements (Heimlich *et al.*, 2000 ; Benbrook, 2004 ; Fernandez-Cornejo et Caswell, 2006). Cette réduction est difficile à chiffrer compte tenu de la diversité des

pratiques de désherbage selon les adventices présentes et du fait que le glyphosate est (et était déjà avant 1996) utilisé aussi avec des variétés non transgéniques, notamment en cas de semis sans labour : les statistiques disponibles ne permettent pas de distinguer les divers types d'usage. Les enquêtes de l'USDA montrent une diminution du nombre de traitements de 1996 à 2001 suivie ensuite d'une réduction bien moins forte, puis d'une très légère reprise en 2006.

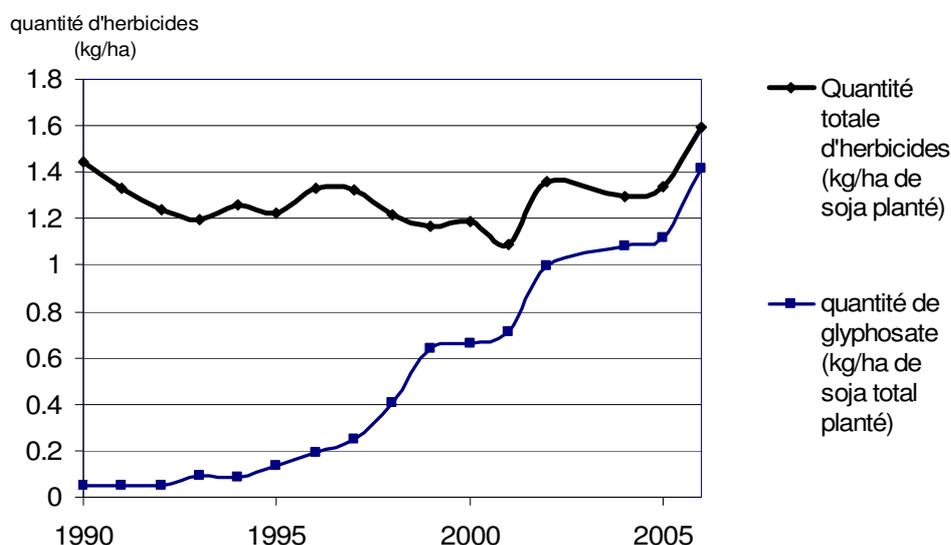


**Figure 4 :** Principaux herbicides utilisés sur l'ensemble des surfaces en soja de 1996 à 2006 (en % de la surface de soja traité par chaque herbicide) (d'après USDA NASS 1991-2007). Avec l'essor du soja tolérant au glyphosate, cet herbicide est utilisé de façon importante ; en effet, il remplace les herbicides utilisés auparavant ; la figure ne montre qu'une partie de l'ensemble des herbicides.

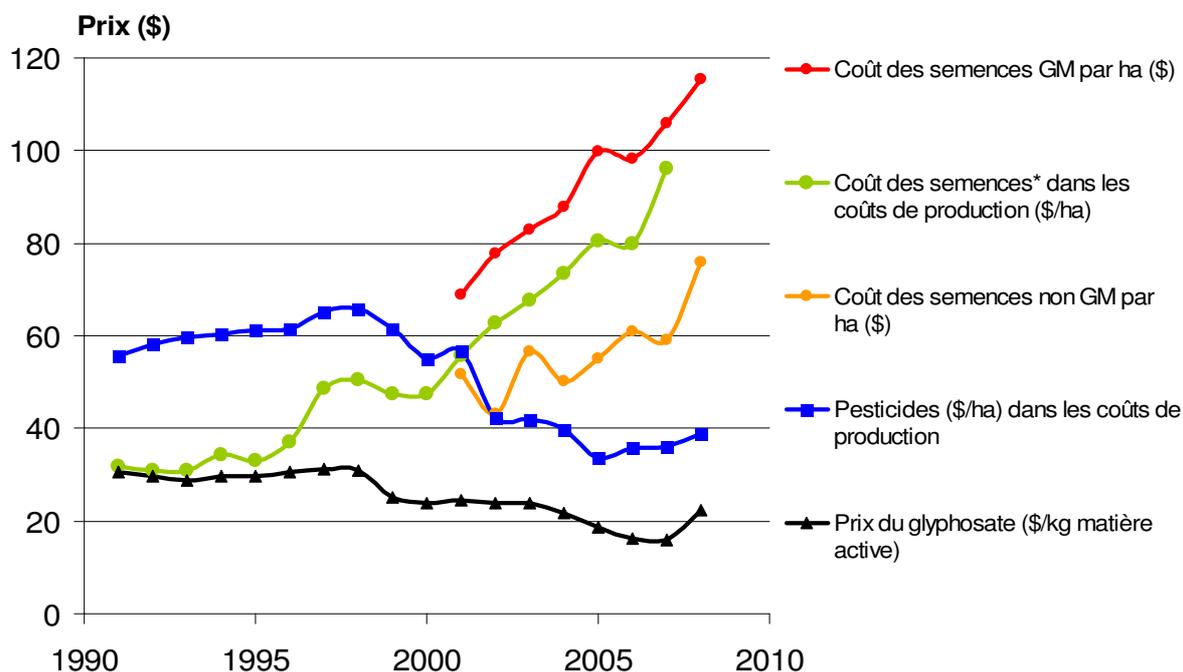
En matière de quantité d'herbicides utilisés sur une surface donnée de soja (Figure 5), celle de glyphosate a bien sûr augmenté du fait de l'essor des variétés transgéniques. De son côté, la quantité totale d'herbicides épanchés sur le soja (glyphosate inclus) a baissé dans un premier temps de 1996 à 2001, mais elle semble connaître ensuite une hausse notamment en 2002 et 2006. De la sorte globalement, sur une surface donnée de soja, le niveau d'emploi total des herbicides de 1996 paraît à nouveau atteint en 2005 et dépassé en 2006 (Figure 5). Cependant, on ne peut pas déduire de ces observations que, comparé au conventionnel, le soja TH nécessite un peu moins d'herbicides dans les premières années, mais ensuite davantage car d'autres facteurs interviennent dans ces évolutions des herbicides utilisés. Outre les éventuels effets des variations climatiques, ce sont notamment le développement des techniques de conservation des sols (TCS, telles le non labour, etc.) et la baisse de prix des herbicides.

En effet avec les TCS, les adventices ne pouvant plus être contrôlées par leur enfouissement lors du labour, on observe assez souvent une hausse de l'usage des herbicides. En matière de prix des herbicides, la diffusion du soja TH ayant entraîné le remplacement d'une partie des désherbants de naguère par le glyphosate, pour limiter leurs pertes de marché et rester concurrentielles, les firmes agrochimiques qui les produisaient ont nettement baissé leurs prix à partir de 1996 (Figure 6). Cela a induit une réduction globale des coûts des traitements herbicides pour tous les producteurs de soja qu'ils utilisent des variétés transgéniques ou non (Lemarié, 2000 ; Bullock et Nitsi, 2001). Cette baisse de prix des herbicides a pu contribuer à un certain accroissement des quantités utilisées. De leur côté,

les semences ont vu leur prix croître au fil des années, ce qui fait que dans les coûts de production du soja, le poste semences a augmenté tandis que celui des herbicides diminuait (Figure 6). Cependant globalement entre 1997 et 2007, la part de ce poste « semences + herbicides » a relativement peu varié dans les coûts de production du soja.



**Figure 5 :** Evolution des quantités d'herbicides, en particulier de glyphosate, sur la sole de soja, 1990 – 2006, d'après les enquêtes USDA-NASS.

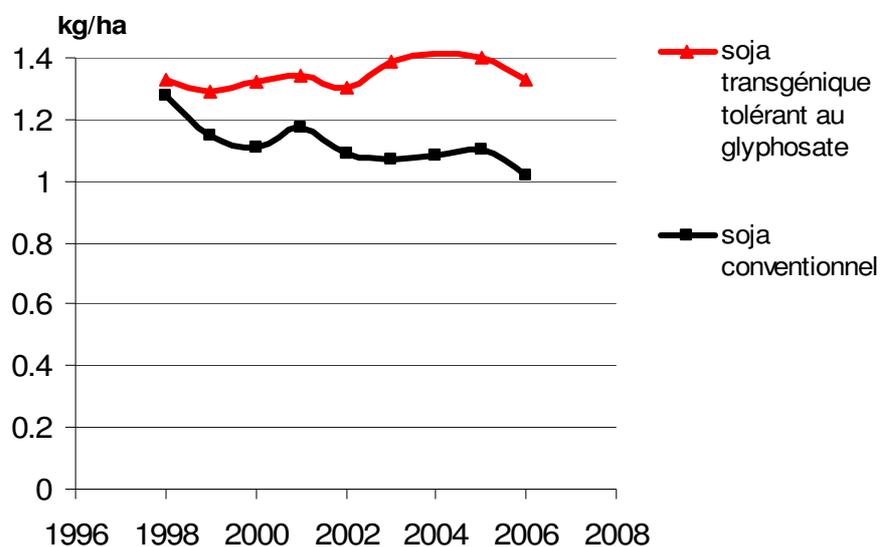


\* tout type de semences, d'après les coûts de production observés

**Figure 6 :** Prix du glyphosate (\$/ kg matière active), prix des semences GM et non GM semées par ha, et coûts des pesticides et des semences dans les coûts de production du soja par ha, 1991-2008 (les doses de semences sont une valeur moyenne, non la quantité réelle utilisée chaque année) (d'après USDA NASS, 1992-2008, et USDA-ERS, 2008b).

Ces observations à partir des enquêtes USDA-NASS sont à peu près corroborées par celles résultant des sondages DMRkynetec qui apportent également d'autres informations. Il apparaît que les cultures

de soja transgénique utilisent un peu plus d'herbicides que celles de soja conventionnel et l'écart augmente quelque peu au fil du temps (mais pas spécialement en 2002 et 2006). Les cultures transgéniques de soja utilisent en moyenne 16% d'herbicides en plus dans les années 1999-2002 et près de 30% en plus dans les années 2003-2006. Pour le soja transgénique, on observe une très faible progression des consommations au fil du temps ; au contraire pour le soja conventionnel, il y a une légère baisse de l'emploi des désherbants au cours du temps, ce qui fait que globalement l'usage des herbicides sur la sole de soja augmente très légèrement de 1998 à 2005, mais rediminue quelque peu en 2006. Finalement, **la consommation en herbicides du soja transgénique paraît un peu plus élevée que celle du soja conventionnel, mais elle ne connaît pas de hausse notable au cours du temps** (Figure 7). Toutes les études effectuées n'aboutissent pas à des résultats similaires, essentiellement en raison des sources utilisées comme c'est le cas de celle de Brookes et Barfoot (Brookes et Barfoot, 2008a et b). Certains auteurs utilisent en effet des évaluations établies à dire d'experts pour les consommations d'herbicides, mais celles-ci nous ont paru trop approximatives et pouvant être biaisées par rapport aux résultats d'enquêtes que nous avons utilisés de notre côté, même si ces derniers comportent aussi des limites.



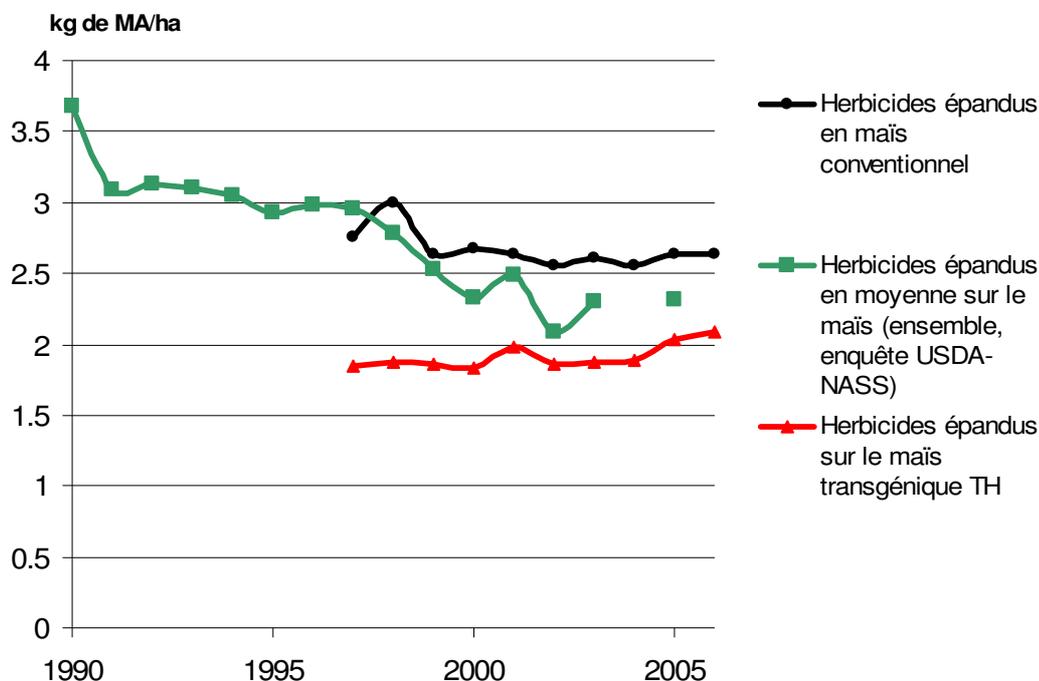
**Figure 7 :** Comparaison des consommations totales d'herbicides à l'ha (en kg de matière active) des sojas conventionnel et tolérant au glyphosate (source: enquêtes de DMRkynetec sur la période 1998-2006)

### 3.3 L'évolution de l'emploi des désherbants sur le maïs tolérant à un herbicide : une économie d'herbicides.

Comme cela a été indiqué, le maïs tolérant à un herbicide a eu aux USA moins de succès que le soja ou le coton tolérant à un herbicide (Figure 3), notamment car les problèmes de désherbage étaient moindres pour le maïs. Cependant il se développe plus rapidement depuis 2006. Il existe en fait 2 types de maïs tolérant à un herbicide, le maïs Liberty Link (LL) (maïs T25) lancé par AgrEvo (devenu Aventis, puis Bayer après diverses fusions-acquisitions) en 1997 et le maïs Roundup Ready (RR) de Monsanto introduit en 1998. En 2000, il y avait aux USA environ 1,2 millions d'ha de maïs RR et 0,8 millions d'ha de maïs LL. Ensuite le maïs RR semble être devenu encore plus prédominant (on ne dispose pas de statistique précise sur l'évolution de la proportion des 2 types de maïs TH). Il faut noter que depuis quelques années le maïs RR possède souvent un, voire deux autres caractères introduits par transgénèse conférant la résistance à certains insectes par la toxine Bt.

Avec ce maïs TH, en général un seul épandage de glufosinate ou de glyphosate n'est pas suffisant pour contrôler les adventices du maïs, on utilise souvent un autre épandage d'herbicide. Cependant, les données statistiques des enquêtes USDA-NASS et de DMRkynetec convergent : **il y a une diminution globale de l'emploi des herbicides sur le maïs au cours du temps** (elle avait d'ailleurs débuté dès le

début des années 1990). Par ailleurs ici, à la différence du soja, **moins d'herbicides en kg/ha sont utilisés sur la culture tolérante à un herbicide que sur la conventionnelle**, d'après les enquêtes de DMRkynetec. **On épand en moyenne moins d'herbicides sur le maïs TH que sur le maïs conventionnel** (Figure 8), l'écart étant de 20 à 37% selon les années.



**Figure 8** : Évolution de la consommation totale d'herbicides sur la sole de maïs aux USA de 1990 à 2005 (d'après les enquêtes USDA-NASS) et comparaison de la consommation d'herbicides en soja conventionnel et soja TH de 1997 à 2006 d'après les enquêtes de DMRkynetec (données en kg de matière active MA par ha)

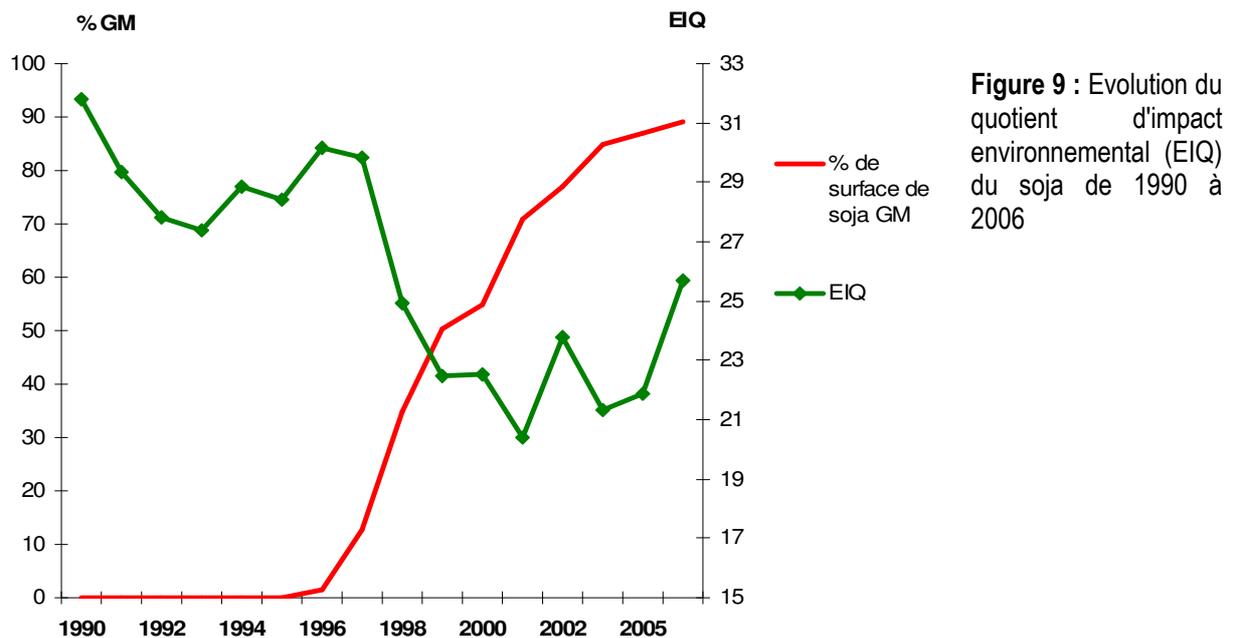
## IV. Les incidences environnementales

### 4.1 Diminution de la toxicité des herbicides utilisés

La quantité de désherbants à elle seule ne saurait être un indicateur valable de leurs effets sur le milieu. Il est nécessaire de pondérer chaque herbicide par des indicateurs rendant compte de ses impacts environnementaux et toxicologiques. Il existe en la matière nombre de paramètres et d'indices. Pour pouvoir faire des évaluations globales, on a recours à des indicateurs composites élaborés par combinaisons d'indicateurs de base : ils agrègent par diverses méthodes les données sur la toxicité des pesticides issues de multiples études (Devillers *et al.*, 2005). Mais ces indicateurs synthétiques sont eux-mêmes très nombreux : plus de 42 ont été répertoriés par Devillers *et al.* (2005). Parmi ceux-ci, nous avons utilisé l'EIQ, Environmental Impact Quotient, mis au point par Kovach (1992). En effet, il prend simultanément en compte trois aspects importants : les effets sur les travailleurs, les effets sur les consommateurs et l'eau, et ceux sur l'environnement. Ces divers effets sont établis à partir de paramètres de toxicité relatifs aux applicateurs, aux travailleurs agricoles, aux consommateurs, au lessivage, aux poissons, oiseaux, abeilles, insectes bénéfiques et organismes du sol. Vu son mode de calcul, plus l'EIQ est élevé, plus l'herbicide considéré est toxique et a un impact sur l'environnement et/ou la santé.

Nous avons donc pris l'EIQ de chacun des désherbants épandus sur le soja, puis nous avons établi l'EIQ pour l'ensemble des herbicides utilisés chaque année en multipliant la quantité de chaque herbicide employé par ha par son EIQ, puis en additionnant les valeurs. Ainsi, pour chaque année nous

évaluons l'EIQ au champ de tous les herbicides utilisés sur le soja, une sorte d'empreinte environnementale de ceux-ci. Il apparaît que le quotient d'impact environnemental sur l'ensemble du soja s'améliore (diminue) de 1996 à 2001, mais ensuite il remonte légèrement les années suivantes. **La toxicité des herbicides utilisés considérés dans leur ensemble a donc diminué nettement avec l'adoption et la diffusion des cultures GM, mais à partir de 2001 une certaine détérioration apparaît** : il semble y avoir une légère progression de l'EIQ sans qu'il retrouve cependant son niveau de 1996. D'autres travaux utilisant un autre indicateur ou d'autres modes de calcul obtiennent également une décroissance du niveau de toxicité des pesticides utilisés (Nelson et Bullock, 2003 ; Gardner et Nelson, 2008 ; Brookes et Barfoot 2008 a et b). Au Brésil et au Canada, on obtient aussi une amélioration de l'impact environnemental du soja transgénique par comparaison au conventionnel mais pas en Argentine.



**Figure 9** : Evolution du quotient d'impact environnemental (EIQ) du soja de 1990 à 2006

Pour le maïs, on observe aussi une diminution de l'impact environnemental au fil du temps à partir de 1997. Les cultures transgéniques semblent donc permettre, dans divers cas au moins, un allègement de l'empreinte environnementale des herbicides utilisés en en utilisant notamment de moins toxiques. Cependant, cela renvoie à la question de l'évaluation du glyphosate, objet de controverse (cf. annexe)

#### 4.2 L'apparition d'adventices résistantes au glyphosate

La forte croissance de l'emploi du glyphosate a diverses causes outre la progression rapide des cultures tolérantes à un herbicide (Woodburn, 2000). D'une part, le brevet sur le glyphosate ayant expiré en septembre 2000 aux USA (dès 1991 dans d'autres pays), les génériques se sont développés et la concurrence entre firmes a été très vive, d'autant plus qu'il s'agit de l'herbicide le plus vendu. Par ailleurs, l'importance de ses ventes de glyphosate était essentielle pour Monsanto tant que celles d'OGM restaient relativement limitées. La progression du glyphosate –Roundup de Monsanto ou générique– s'est faite notamment avec les plantes TH, mais aussi dans les usages non agricoles, ou encore avec les TCS. Ainsi, les statistiques de l'Environmental Protection Agency (EPA) montrent qu'aux USA l'emploi annuel du glyphosate en milliers de tonnes de matière active serait passé de 3,2 en 1987 à 16,3 en 1997, 32 en 1999 et à près de 50 en 2001 si l'on comptabilise tous ses usages,

agricoles et autres. Le glyphosate à usage agricole serait lui passé d'environ 3 000 tonnes en 1987 à 40 000 tonnes en 2001, soit une multiplication de sa quantité par 13 en 14 ans. (Aspelin et Grube, 1999 ; Donaldson *et al.*, 2002 ; Kiely *et al.*, 2004).

Cette forte hausse de l'emploi du glyphosate – naguère utilisé sur des surfaces bien plus restreintes – a entraîné depuis quelques années l'apparition d'adventices résistantes à ce désherbant (Owen et Zelaya, 2005 ; Cerdeira et Duke, 2006 ; Service, 2007 ; Duke et Powles, 2008 ; Powles, 2008). Même si certaines propriétés du glyphosate ont freiné cela par comparaison aux autres herbicides ayant connu un phénomène similaire, des adventices résistantes au glyphosate (9 fin 2008) sont déjà apparues aux USA dans divers Etats, ainsi qu'ailleurs dans le monde (15 au total fin 2008) (Figure 10) (Heap, 2009). Cette perte partielle d'efficacité du glyphosate est considérée comme préjudiciable car il devra être complété ou remplacé par d'autres herbicides qui risquent d'être plus nocifs ou plus difficiles à employer vu le profil relatif du glyphosate (Marsh *et al.*, 2006). En ce sens, la très forte expansion actuelle de l'emploi du glyphosate pourrait se révéler à moyen terme non durable, du moins dans un certain nombre de régions. Diverses mesures sont promues pour faire face à ce problème : cela va d'une meilleure gestion du désherbage par le glyphosate à la commercialisation annoncée de plantes transgéniques tolérantes à d'autres herbicides tels le dicamba, le glufosinate, etc. (Bonny, 2008 ; Duke et Powles, 2008).

Nombre cumulé d'adventices  
devenues résistantes au glyphosate

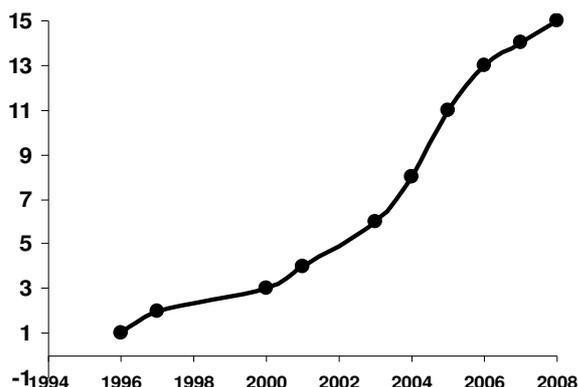


Figure 10 : Nombre d'adventices devenues tolérantes au glyphosate dans le monde depuis 1996 (toutes ne correspondent pas à des situations où il y avait des cultures tolérantes au glyphosate) (établi d'après Heap, 2009)

## Conclusion

L'utilisation de cultures transgéniques TH comme méthode de désherbage a suscité beaucoup de rejet, notamment en France. Cela se trouve renforcé par les annonces faites dans les années 1980 selon lesquelles les biotechnologies permettraient de valoriser mieux le potentiel du vivant et par là de se passer de certains produits chimiques. Pourtant, dans divers pays, une part substantielle des agriculteurs les a adoptées. La majeure partie de la sole en soja est ainsi TH aux USA et en Argentine, ainsi qu'une bonne part du maïs ; plus récemment, la betterave TH introduite aux USA en 2008 s'est implantée sur une part importante de la sole. Cela témoigne d'avantages pour les agriculteurs malgré l'existence d'inconvénients. Nous avons cherché à analyser les uns et les autres : gain de temps, désherbage plus facile, bonne association aux TCS, etc. mais dépendance accrue envers un nombre restreint de firmes semencières et emploi important du glyphosate en remplacement des désherbants utilisés auparavant, etc.

L'analyse des doses d'herbicides employées sur les variétés transgéniques par comparaison aux variétés conventionnelles montre dans le cas du soja une consommation plus élevée et, dans le cas du maïs, une consommation plus faible d'herbicides. De même, l'évolution au cours du temps, quand une

part croissante de la culture devient transgénique, montre une légère tendance pour le soja à l'accroissement des consommations d'herbicides, et, pour le maïs, à leur baisse. Mais il ne suffit pas d'observer les quantités d'herbicides utilisés. Ce sont surtout leurs effets toxicologiques et environnementaux qui sont à considérer. On note en la matière une certaine amélioration des impacts environnementaux avec la culture transgénique de soja ou de maïs par comparaison à la conventionnelle.

Ainsi, il apparaît difficile de tirer un bilan général car, d'une part, l'évolution des herbicides avec les cultures transgéniques varie selon les cultures comme le montre les cas du soja et du maïs et, d'autre part, avantages (meilleur bilan environnemental en général des cultures transgéniques) et inconvénients (utilisation importante d'un seul type d'herbicides) se côtoient. Cela dépend du type de culture.

De façon plus large, il faut noter qu'on ne peut pas non plus parler des OGM en général, mais qu'il faut analyser ceux-ci au cas par cas selon le contexte et les cultures considérés. Par ailleurs, la question des impacts des OGM étant l'objet de fréquents débats, il faut souligner que nombre de « leurs impacts » ne provient pas des OGM en eux-mêmes, mais des caractéristiques et des objectifs qu'on leur donne via le type de nouveaux caractères introduits, du contexte où ils s'insèrent et enfin de la façon dont on les utilise. Et au niveau économique, ce qu'on qualifie "d'impacts des OGM" ne relève-t-il pas souvent en fait des impacts du système économique dominant ? En effet, une partie des "impacts des OGM" ne provient pas en fait *stricto sensu* du génie génétique en lui-même, mais plutôt de la façon dont il est orienté, utilisé, réglementé et mis en œuvre en pratique. Ainsi, le génie génétique *per se* ne demande pas de brevets ou de concentration des firmes, c'est le système économique et social dominant qui induit l'existence de brevets et de concentration et cela d'autant plus que la recherche agronomique publique a tendance à devenir moins importante.

En d'autres termes, même si beaucoup jugent les cultures transgéniques TH comme une nouvelle technique bien éloignée du développement durable, elle pourrait s'en approcher si elle était mise en œuvre de façon différente. Cela supposerait au niveau technique une meilleure rotation des différents types de culture, une alternance des herbicides et l'emploi d'autres méthodes (désherbage localisé ou mécanique, etc.). Ceci signifie une meilleure gestion et gouvernance de cette innovation. Il en est de même au niveau économique et social : il faudrait que la recherche de rentabilité rapide à court terme laisse place à des approches plus durables. Ainsi, la gouvernance de l'innovation et la façon dont on l'utilise qui dépendent du système économique dominant sont sans doute en jeu plus que l'innovation technologique elle-même.

### Références bibliographiques

Alexander C., 2006. Farmer decisions to adopt genetically modified crops. CAB Reviews: 2006/1 N° 045. doi: 10.1079/PAVSNNR20061045

APHIS, 2009. USA Environmental Releases Database (information on field tests of GM organisms). USDA, APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service). Searchable Database available at the Information Systems for Biotechnology <http://www.isb.vt.edu/>

ASA (American Soybean Association), 2001 Conservation Tillage Study, Saint-Louis, MO, Nov. 2001, 22 p.

Ash M., 2001. Soybeans: Background and Issues for Farm Legislation, USDA-ERS report N° OSC-0701-01, July 2001, 9 p.

Aspelin A., Grube A.H., 1999. Pesticides Industry Sales and Usage: 1996 and 1997 Market Estimates, USEPA, Washington, Nov. 1999.

- Barnes R.L., 2000. Why the American Soybean Association supports transgenic soybeans, *Pest Management Science* 56, 580-583.
- Benbrook C.M., 2004. Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States: The First Nine Years, BioTech InfoNet, Technical Paper N. 7, Sandpoint, Idaho, USA, 53 p.
- Bonny S., 2008. Genetically modified glyphosate-tolerant soybean in the USA: adoption factors, impacts and prospects. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 21-32.
- Bonny S., Sausse C., 2004. Les cultures transgéniques permettent-elles de réduire l'usage des produits phytosanitaires ? Considérations à partir du cas du soja tolérant au glyphosate, *OCL Oléagineux, Corps gras, Lipides* 11, 85-91.
- Brookes G., Barfoot P., 2008a. Global Impact of Biotech Crops: Socio-Economic and Environmental Effects, 1996-2006. *AgBioForum* 11, 21-38.
- Brookes G., Barfoot P., 2008b. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2006. PG economics Ltd, Dorchester, UK, 118 p.
- Bullock D., Nitsi E., 2001. Roundup Ready Soybean Technology and Farm Production Costs: Measuring the Incentive to adopt genetically modified seeds, *American Behavioral Scientist* 44, 1283-1301. DOI: 10.1177/00027640121956827.
- Carpenter J., 2001. Case Study in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology: Roundup Ready Soybeans and Bt field corn. NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, Jan. 2001, 56 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 1999. Herbicide Tolerant Soybeans: Why Growers are adopting Roundup Ready Varieties, *AgBioForum* 2, 65-72.
- Carpenter J., Gianessi L., 2000. Agricultural Biotechnology: Benefits of Transgenic Soybeans, NCFAP, Washington, April 2000, 105 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 2001. Agricultural Biotechnology: Updated Benefit Estimates. NCFAP, Washington, Jan. 2001, 48 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 2002. Case Study in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology: RR Soybeans. In: Santaniello V., Evenson R.E., Zilberman D., (Eds.), *Market Development for Genetically Modified Food*, Wallingford, CABI Publishing, pp. 227-243.
- Cerdeira A.L., Duke S.O., 2006. The Current Status And Environmental Impact Of Glyphosate Resistant Crop: A Review, *Journal of Environmental Quality* 35, 1633-1658. DOI: 10.2134/jeq2005.0378.
- CTIC, 2004. National crop residue management survey, CTIC (Conservation Technology Information Center), West Lafayette, Indiana, USA et USDA-NASS, Washington.
- Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.L., Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides, *Lavoisier, Tec&Doc*, 278 p.
- Donaldson D., Kiely T., Grube A., 2002. Pesticides Industry Sales and Usage: 1998 and 1999 Market Estimates, USEPA, Washington, 2002.
- Duke S.O., Powles S.B., 2008. (Eds). *Glyphosate-Resistant Weeds and Crops*. *Pest Management Science*, Special Issue, 64, 317-496.
- Fawcett R., Towery D., 2002. Conservation Tillage and Plant Biotechnology: How New Technologies Can Improve the Environment By Reducing the Need to Plow. CTIC (Conservation Technology Information Center), West Lafayette, 2002, 24 p
- Fernandez-Cornejo J., Caswell M., 2006. The First Decade of Genetically Engineered Crops in the United States, USDA ERS, Economic Information Bulletin, 11, April 2006.
- Fernandez-Cornejo J., Hendricks C., Mishra A., 2005. Technology Adoption and Off-Farm Household Income The Case of Herbicide-Tolerant Soybeans, *Journal of Agricultural & Applied Economics* 37, 549-563.
- Fernandez-Cornejo J., McBride W.D., 2002. Adoption of Bioengineered Crops. Agricultural Economic Report, N. AER810, Economic Research Service, USDA, Washington, 2002.  
[www.ers.usda.gov/publications/aer810/aer810.pdf](http://www.ers.usda.gov/publications/aer810/aer810.pdf)

- Foreman L., Livezey J., 2002. Characteristics and Production Costs of U.S. Soybean Farms. USDA-ERS Statistical Bulletin N SB974-4. April 2002.
- Gardner J.C., Nelson G.C., 2008. Herbicides, glyphosate resistance and acute mammalian toxicity: simulating an environmental effect of glyphosate-resistant weeds in the USA. *Pest Management Science* 64, 470-478.
- Gardner J.G., Nelson C.H., 2007. Genetically Modified Crops and Labor Savings in US Crop Production, Paper presented at the 2007 Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, 4-7 February 2007, Mobile, Alabama, 20 p.
- Gianessi L.P., 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, Special Issue, 64, 346-352. DOI: 10.1002/ps.1490
- Gianessi L.P., Silvers C.S., Sankula S., Carpenter J.E., 2002. Plant Biotechnology Current and Potential Impact For Improving Pest Management In U.S. Agriculture: An Analysis of 40 Case Studies, NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, 32 p.
- Heap I., 2009. International survey of herbicide resistant weeds, Herbicide Resistance Action Committee, and Weed Sci. Soc. Am. [www.weedscience.org](http://www.weedscience.org)
- Heimlich R.E., Fernandez-Cornejo J., McBride W., Klotz-Ingram C., Jans S., Brooks N., 2000. Genetically Engineered Crops: Has Adoption Reduced Pesticide Use? *Agricultural Outlook* (USDA ERS), August 2000, 13-17.
- James C., 2007. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2007. ISAAA Briefs N 37. ISAAA, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications), Ithaca, NY.
- Kiely T., Donaldson D., Grube A., 2004. Pesticides Industry Sales and Usage: 2000 and 2001 Market Estimates, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, May 2004.
- Kleter G.A. et al. 2007. Altered pesticide use on transgenic crops and the associated general impact from an environmental perspective. *Pest Management Science*, 63, 1107-1115.
- Knezevic S.Z., Evans S.P., Mainz M., 2003. Yield penalty due to delayed weed control in corn and soybean, *Crop Management* Feb. 2003. DOI:10.1094/CM-2003-0219-01-RS.
- Kovach J., Petzoldt C., Degni J., Tette J., 1992. A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides, New York Agricultural Experiment Station, New York's Food and Life Sciences Bulletin 139. Cornell University, Ithaca, NY, 8 p.
- Lemarié S., 2000. Analyse économique du développement des cultures à base d'organismes génétiquement modifiés aux Etats-Unis, Volet 1: Le développement des OGM agronomiques, INRA-SERD, Grenoble, 42 p.
- Marra M.C., Piggott N.E., Carlson G.A., 2004. The Net Benefits, Including Convenience, of Roundup Ready® Soybeans: Results from a National Survey, NSF Center for Integrated Pest Management, Technical Bulletin 2004-3, Raleigh, NC, 40p.
- Marsh S.P., Llewellyn R.S., Powles S.B., 2006. Social costs of herbicide resistance: the case of resistance to glyphosate Poster paper, International Association of Agricultural Economists Conference, Gold Coast, Australia, August 12-18, 2006.
- Nelson G.C., 2001, (Ed.). *Genetically Modified Organisms in Agriculture, Economics and Politics*, Academic Press, London, 344 p.
- Nelson G.C., Bullock D.S., 2003. Simulating a relative environmental effect of glyphosate-resistant soybeans, *Ecological Economics* 45, 189-202. DOI:10.1016/S0921-8009(03)00011-9.
- Owen M.D.K., 2007. Genetically modified crops: successes and problems in the Midwest USA, *Proceedings of the 16th International Plant Protection Congress*, Glasgow, 2007.
- Owen M.D.K., Zelaya I.A., 2005. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides, *Pest Management Science* 61, 301-311. DOI: 10.1002/ps.1015.
- Piggott N.E., Marra M.C., 2008. Biotechnology Adoption Over Time In the Presence of Non-Pecuniary Characteristics that Directly Affect Utility: A Derived Demand Approach. *AgBioForum* 11, 58-70.
- Powles S.B., 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. *Pest Management Science* 64, 360-365. DOI:10.1002/ps.1525.

- Sankula S., Marmon G., Blumenthal E., 2005. Biotechnology derived crops planted in 2004. Impacts on US agriculture, NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, 101 p.
- Sanvido O., Romeis J., Bigler F., 2007. Ecological impacts of genetically modified crops: ten years of field research and commercial cultivation, *Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology* 107, 235–278. DOI 10.1007/10\_2007\_048.
- Service R.F., 2007. A Growing Threat Down on the Farm, *Science* 316, (5828), 25 May 2007, 114-117. DOI: 10.1126/science.316.5828.1114.
- UIUC, 1999. Illinois Agronomy Handbook 1999-2000, University of Illinois, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, Urbana-Champaign, 245 p.
- US GAO, 2000. Information on prices of genetically modified seeds in the United States and Argentina, US General Accounting Office, Washington, 25 p.
- USDA ERS, 2008a. Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S. Data sets, USDA Economic Research Service. <http://www.ers.usda.gov/Data/BiotechCrops/>. July 2007.
- USDA ERS, 2008b. Commodity Costs and Returns, USDA Economic Research Service <http://www.ers.usda.gov/Data/CostsAndReturns/>
- USDA NASS, 1991 to 2007. Agricultural Chemical Usage. 1990 to 2006 Field Crops Summary, Annual publication from USDA Economics, Statistics and Market Information System, Albert R. Mann Library, Cornell University, USA.
- USDA NASS, 1992 to 2008. Agricultural Prices, Annual publication from USDA National Agricultural Statistics Service, Washington DC, USA, April.
- Woodburn A.T., 2000. Glyphosate: production, pricing and use worldwide, *Pest Management Science* 56, 309-312.

## Annexe 1 : Le glyphosate: un profil toxicologique et environnemental favorable mais vigoureusement controversé

### Extrait de

DELABAYS N., BOHREN C., 2007. *Le glyphosate: bilan de la situation mondiale et analyse de quelques conséquences malherbologiques pour la Suisse*. Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. Vol. **39**, 333-339.

De nombreuses synthèses, détaillées et complètes, sur les aspects toxicologiques du glyphosate ou son impact sur l'environnement sont disponibles dans la littérature scientifique (Giesy *et al.*, 2000; Pelfrène, 2003; Williams *et al.*, 2000). Globalement, cette matière active présente un impact toxicologique et éco-toxicologique relativement modéré, comparativement à d'autres pesticides très utilisés.

**Aspects sanitaires** Le glyphosate est relativement peu soluble dans les graisses, ce qui minimise les risques de bio-accumulation dans la chaîne alimentaire. De plus, son mode d'action (inhibition de l'EPSPS) touche une voie métabolique propre aux végétaux. Globalement, sa toxicité pour les animaux et les humains est donc relativement modérée (Pelfrène, 2003). Pourtant, de plusieurs enquêtes menées auprès d'utilisateurs et de services médicaux, il ressort que les herbicides à base de glyphosate sont à l'origine d'un grand nombre de plaintes pour atteinte à la santé (Goldstein *et al.*, 2002). La plupart de ces plaintes concernent des irritations des yeux ou des voies respiratoires supérieures, qui peuvent être attribuées aux formulations du glyphosate. Ces dernières, souvent assez agressives pour assurer une bonne pénétration de la matière active dans les plantes traitées, sont effectivement susceptibles de causer, par contact et inhalation notamment, des irritations de la peau, des yeux et des voies respiratoires (Williams *et al.*, 2000). Parallèlement, des publications scientifiques mentionnent régulièrement des effets toxicologiques sévères dus au glyphosate. On l'a accusé, par exemple, d'être mutagène et génotoxique (Bolognesi *et al.*, 1997), potentiellement associé au lymphome non-hodgkinien (Hardell *et al.*, 2002), au myélome multiple (De Roos *et al.*, 2005) ou, dernière polémique en date, d'avoir des effets délétères sur les cellules placentaires humaines, ainsi qu'une action sur la synthèse des hormones sexuelles (Richard *et al.*, 2005). Selon les défenseurs du glyphosate, ces études, si elles permettent effectivement de mieux comprendre certains mécanismes de toxicité, voire d'identifier des risques potentiels liés à l'utilisation d'un produit, ne sont pas pertinentes pour estimer le risque sanitaire qu'il pose en conditions réelles d'utilisation; le plus souvent, ces dernières ne sont effectivement pas prises en compte. Ils relèvent par ailleurs que ces tests, lorsqu'ils sont appliqués à d'autres produits courants, y compris des aliments d'origine naturelle, aboutissent souvent à des résultats similaires. En fait, les dernières évaluations de risques des instances officielles européennes ont confirmé, dans le cadre des conditions d'utilisation proposées, l'innocuité des produits à base de glyphosate (European Commission, 2002). Reste que l'importance prise par cette molécule justifie une vigilance sanitaire rigoureuse. Quant aux agriculteurs, ils doivent évidemment strictement respecter les règles de sécurité et les précautions requises lors de l'utilisation de pesticides (Milon et Vernez, 2006).

**Aspects environnementaux** Une des caractéristiques du glyphosate est sa très forte capacité à se fixer aux particules du sol, ce qu'exprime son indice Koc(1) particulièrement élevé. Ce caractère, combiné à une dégradation microbienne relativement rapide, limite théoriquement les risques de lessivage et de contamination des eaux. C'est pourquoi, malgré sa forte solubilité, le glyphosate a été longtemps considéré comme peu dangereux pour la qualité des eaux souterraines et de surface. Mais le considérer comme un produit "amical" pour l'environnement serait exagéré, ne serait-ce que par la puissance de son effet herbicide vis à vis de la majorité des plantes. Son application, comme d'ailleurs tout désherbage, vise la flore spontanée des parcelles traitées et donc, au moins indirectement, l'ensemble des organismes écologiquement liés à cette végétation. Parallèlement, la largeur de son spectre d'efficacité impose d'être particulièrement prudent avec les risques de dérive. A son avantage, en favorisant le développement des façons culturales simplifiées, le glyphosate contribue indirectement à réduire les risques d'érosion. Cet argument est particulièrement pertinent dans les régions à sols fragiles, sujets à l'érosion, notamment éolienne. En soi, l'abandon du labour permet également de substantielles économies en énergie fossile.

(1) Koc = indice quantifiant le degré de fixation de la molécule aux particules du sol (plus l'indice est élevé, moins la molécule est mobile).

### Références

- Bolognesi C., Bonatti S., Degan P., Gallerani E., Peluso M., Rabboni R., Roggieri P. & Abbondandolo A., 1997. Genotoxic activity of glyphosate and its technical formulation Roundup. *J. Agric. Food Chem.* **45**, 1957-1962.
- DeRoos A. J., Blair A., Rusiecki J. A., Hoppin J. A., Svec M., Dosemeci M., Slander D. P. & Alavanja M. C., 2005. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the agricultural health study. *Environ. Health Perspect.* **113**, 49-54.
- European Commission, 2002. Review report for the active substance glyphosate. Page Web: [http://ec.europa.eu/food/fs/ph\\_ps/pro/eva/existing/list1\\_glyphosate\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/food/fs/ph_ps/pro/eva/existing/list1_glyphosate_en.pdf)
- Giesy J. P., Dobson S. & Solomon K. R., 2000. Ecotoxicological risk assessment for Roundup Herbicide. *Rev. Environ. Contamin. Toxicol.* **107**, 33-120.
- Goldstein D. A., Acquavella J. F., Mannion R.M. & Farmer D. R., 2002. An analysis of glyphosate data from the California Environmental Protection Agency pesticide illness surveillance program. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.* **40**, 885-892.
- Hardell L., Eriksson M. & Nordsrom M., 2002. Exposure to pesticides as risk factor for non-Hodgkin's lymphoma and hairy cell leukaemia: pooled analysis of two Swedish case-control studies. *Leuk. Lymphoma* **43**, 1043-1049
- Milon A. & Vernez D., 2006. Traitements phytosanitaires : évaluation des risques pour l'utilisateur. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **39**, 79-82.
- Pelfrène A., 2003. Glyphosate : toxicologie et évaluation du risque pour l'homme. *Environnement, Risques & Santé* **6**, 323-334.
- Richard S., Moslemi S., Sipahutar H., Benachour N. & Seralini G.-E., 2005. Differential effects of glyphosate and Roundup on human placental cells and aromatase. *Environmental Health Perspective* **113**, 716-720.
- Williams G. M., Kroes R. & Munro I. C., 2000. Safety evaluation and risk assessment of the herbicide Roundup and its active ingredient, glyphosate, for humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **31**, 117-165.