

**Université catholique de Louvain**  
**Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale**  
**Département de biologie appliquée et des productions agricoles**  
**Unité de génétique**

**Mise au point d'une méthodologie d'évaluation des  
possibles impacts agronomiques et socio-  
économiques des cultures transgéniques sur les  
systèmes agraires et les filières agro-alimentaires**

**Delphine Vromman, Gaëtan Vanloqueren  
et Philippe Baret**

**Projet soutenu par le  
Service Public Fédéral : Santé Publique,  
Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement  
Direction générale Environnement  
Cahier des charges CI/23023**

**Version définitive révisée du 25 novembre 2005**  
**[www.gena.ucl.ac.be](http://www.gena.ucl.ac.be)**

C'est une chose  
de penser que l'on est  
sur le bon chemin,  
une autre de croire que  
ce chemin est le seul

Paulo Coelho

*Sur le bord de la rivière Piedra  
je me suis assise et j'ai pleuré*

*Nous tenons à remercier le Service public fédéral de la santé publique et de la sécurité de la chaîne alimentaire et de l'environnement pour son financement et à Lucette Flandroy qui a assuré le suivi du projet. Ce travail a pu bénéficier du soutien d'un comité de suivi actif et constructif composé de Cindy Boonen, Marian Deblonde, Martine Delanoy, Jean-Claude Grégoire, Ulrik Lenaerts, Dominique Perreaux et Marc Vanheuckelom. Les études de cas s'appuient sur le travail de deux mémorantes, Mélanie Braibant et Yasmina Fiasse et sur le travail de DEA de Gaëtan Vanloqueren. Merci à toutes les personnes qui ont accepté de participer à nos entretiens et de partager leurs compétences.*

### **Avertissement :**

Ce travail est un objet intermédiaire : il fait la synthèse de travaux réalisés au sein de notre laboratoire dans la perspective d'une étude systémique de l'innovation en agriculture au départ d'une demande d'évaluation d'une plante transgénique. Notre objectif dans le cadre de ce projet est d'illustrer la faisabilité d'une telle approche et d'identifier le type d'objet final. Un travail scientifique est réalisé en parallèle et fait l'objet d'une recherche doctorale conduite par Gaetan Vanloqueren et qui a donné lieu à des publications scientifiques beaucoup plus pointues. La liste de ces publications et des versions pdf sont disponibles sur le site <http://www.gena.ucl.ac.be/transgeniques/>.

Le caractère intermédiaire de l'étude se marque notamment au niveau des tableaux de synthèse. A la fin de chaque étude de cas, un tableau de synthèse pour les innovations est présenté. Dans ce tableau figure les avantages et les inconvénients ainsi que les facteurs de développement pour chaque innovation. Nous entendons par avantages et inconvénients, les conséquences positives et négatives de l'utilisation de l'innovation. Les facteurs de développement représentent les causes du développement ou non-développement de l'innovation. Ces tableaux ne sont pas exhaustifs et des différences de niveaux de connaissances existent entre ces tableaux. En effet, le stade de développement est différent pour chaque innovation. De plus, nous avons plus de données pour le génie génétique que pour les voies d'innovation du type agro-écologie (lutte biologique, résistance systémique induite,...). Par ailleurs, une voie d'innovation sur laquelle peu de recherche a été menée, peut ne pas avoir encore produits de résultats satisfaisants, à la différence d'une voie d'innovation où de nombreuses recherches ont été réalisées sur ce domaine qui n'aboutirait toujours pas à une solution satisfaisante. La comparaison de ces voies d'innovation est alors difficile.

Ce document a donc plus le statut d'un « working paper » destiné à évoluer et à contribuer à un débat que celui d'un document scientifique définitif qui demande un travail de beaucoup plus longue haleine.

## Résumé :

L'évaluation actuelle des plantes génétiquement modifiées se focalise essentiellement sur les risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement. Par contre, la pertinence générale de cette innovation, prenant en compte notamment des critères socio-économiques plus larges et la notion de développement durable du système agricole, n'est que très faiblement intégrée actuellement au processus d'évaluation. Le présent travail est une première contribution à une approche systémique de la pertinence des plantes transgéniques appliquée à trois situations dans le contexte belge : le maïs résistant aux herbicides, la betterave résistant à la rhizomanie et le pommier résistant à la tavelure.

Notre projet de recherche entend par « pertinence » d'une innovation technique, sa capacité à répondre aux problèmes pour lesquels elle a été développée sans en créer de nouveaux. Les analyses se sont ciblées sur les aspects agronomiques, environnementaux et socio-économiques. Pour chaque étude de cas, nous avons mis en place une approche systémique qui part du problème et qui replace l'innovation dans son contexte. Nous avons identifié les stratégies existantes actuellement et les innovations qui ne sont pas encore appliquées. Les avantages et les inconvénients pour les stratégies actuelles et les innovations futures sont présentés. Pour ces études de cas, l'information provient d'une part de la réalisation d'entretiens auprès de divers acteurs du monde agricole et scientifique et d'autre part de la consultation de la bibliographie existante sur le sujet.

Les trois études de cas ont été choisies pour couvrir des cultures qui sont utilisées pour l'alimentation animale ou pour l'alimentation humaine et dont les filières sont différentes. Les plantes génétiquement modifiées présentées ici comme innovations sont soit résistantes à un herbicide soit résistantes à une maladie virale ou fongique. L'état de développement de l'innovation transgénique est à des stades différents.

La première étude de cas concerne le problème du désherbage en maïs. Le maïs RR, maïs modifié génétiquement pour être résistant au Roundup, un herbicide total. Il est déjà utilisé aux Etats-Unis et au Brésil.

La deuxième étude de cas est le problème de la rhizomanie en culture de betteraves. La rhizomanie est une maladie causée par un virus, transmis par un vecteur *Polymyxa betae*. La betterave transgénique résistante à la rhizomanie s'ajoutera peut-être demain comme une innovation contre la rhizomanie aux côtés des variétés tolérantes obtenues par sélection classique et disponibles aujourd'hui. L'élasticité de la filière betteraves-sucre est faible et la filière travaille à grande échelle. Le choix de la coexistence semble dans ce cas précis impossible vu le caractère très intégré de la filière.

La troisième étude de cas aborde le problème de la tavelure en arboriculture. La tavelure est une maladie fongique qui engendre des taches sur les pommes rendant celles-ci invendables. Les pommes sont utilisées directement pour l'alimentation humaine. Les aspects socio-économiques ont une plus grande importance dans cette filière. Actuellement, les pommiers résistants à la tavelure ne percent pas le marché malgré de réels avantages agronomiques. Les pommiers transgéniques résistants à la tavelure y arriveront-ils ? Tous deux présentent l'avantage de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires et leurs impacts négatifs. Dans ce cas, la plante transgénique est encore en cours de développement.

L'utilité de l'approche systémique que nous proposons, illustrée par les trois études de cas, est finalement discutée dans la dernière partie. Nous passons en revue les limites intrinsèques à l'approche, ses perspectives d'amélioration pour devenir un réel outil d'aide à la décision publique et les possibilités de son application dans les procédures règlementaires, comme le Protocole de Carthagène et la directive européenne 2001/18. Etant donné le contexte politique et international, il apparaît que les plus grandes possibilités d'application de notre approche résident peut-être davantage pour des études de cas par rapport à des plantes transgéniques précises et des systèmes agraires bien identifiés ou, en amont, dans la définition des politiques de recherches. Des propositions pour une politique de recherche « systémique » sur les plantes transgéniques sont finalement émises.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un financement du Service public fédéral de la santé publique et de la sécurité de la chaîne alimentaire et de l'environnement.

# Table des Matières

## **Partie 1 : Introduction** (Ph. Baret et Delphine Vromman)

<b>1. Contexte.....</b>	<b>2</b>
1.1. Contexte général .....	2
1.2. Ancrage du rapport dans la dynamique de recherche .....	2
1.3. Pourquoi une approche systémique ?.....	2
1.4. Un résultat intermédiaire et donc insatisfaisant .....	3
1.5. La méthode .....	3
1.5.1. Définition de la notion de pertinence.....	3
1.5.2. Analyse systémique.....	3
1.5.3. Méthodologie.....	4
1.5.4. Enquête par entretiens .....	4
1.6. Le canevas .....	5

## **Partie 2 : Etudes de cas** (Delphine Vromman et Philippe Baret)

<b>2. Evaluation systémique de la pertinence du maïs transgénique RR .....</b>	<b>7</b>
2.1. La problématique : Désherbage du maïs .....	8
2.1.1. Description du problème .....	8
2.1.2. Les implications .....	10
2.2. Stratégies de lutte actuelles .....	12
2.2.1. Description des stratégies.....	12
2.2.2. Etats des lieux de l'utilisation des stratégies .....	14
2.2.3. Avantages et inconvénients des différentes stratégies .....	15
2.2.4. Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées .....	18
2.3. Les innovations.....	19
2.3.1. Description des innovations .....	19
2.3.2. Synthèse des principes agronomiques des innovations.....	25
2.4. Liens entre innovations et filière .....	25
2.4.1. Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovations .....	25
2.4.2. Avantages, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques.....	35
<b>3. Evaluation systémique de la pertinence d'une betterave résistante à la rhizomanie .....</b>	<b>41</b>
3.1. La problématique : Rhizomanie en culture de betteraves.....	42
3.1.1. Description du problème .....	42
3.1.2. Implications (Figure 5).....	45
3.2. Stratégies de lutte actuelles .....	46
3.2.1. Description des stratégies.....	46
3.2.2. Etats des lieux de l'utilisation des stratégies .....	48
3.2.3. Avantages et inconvénients des différentes stratégies .....	49
3.2.4. Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées .....	50
3.3. Innovations .....	51
3.3.1. Description des innovations .....	51
3.3.2. Synthèse des principes agronomiques des innovations.....	55
3.4. Liens entre innovations et filière .....	56
3.4.1. Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovation.....	56
3.4.2. Avantage, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques .....	63
<b>4. Evaluation systémique de la pertinence des pommiers transgéniques résistants à la tavelure.....</b>	<b>66</b>
4.1. La problématique : la tavelure en arboriculture.....	67
4.1.1. Description du problème : .....	67
4.1.2. Implications (Figure 7).....	70

4.2.	<i>Stratégies de luttés actuelles</i> .....	71
4.2.1.	Description des stratégies.....	71
4.2.2.	Etats des lieux de l'utilisation des stratégies .....	73
4.2.3.	Avantages et inconvénients des différentes stratégies .....	74
4.2.4.	Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées .....	77
4.3.	<i>Innovations</i> .....	78
4.3.1.	Description des innovations .....	78
4.3.2.	Synthèse des principes agronomiques des innovations.....	83
4.4.	<i>Liens entre innovations et filière</i> .....	84
4.4.1.	Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovation .....	84
4.4.2.	Avantage, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques .....	90

**Partie 3 : Etudes de cas** (Gaëtan Vanloqueren)

**5. Conclusions du projet de recherche. Passer d'études de cas au développement d'une nouvelle approche d'évaluation des plantes transgéniques .....** 94

5.1.	<i>Le Protocole de Cartagène</i> .....	94
5.2.	<i>Avantages et inconvénients de l'approche systémique de la pertinence des plantes transgéniques</i> ..	95
5.3.	<i>Amélioration de la méthode d'évaluation systémique de la pertinence</i> .....	96
5.3.1.	Une grille de critères pour évaluer les innovations scientifiques en agriculture .....	96
5.3.2.	Evaluer et comparer des voies d'innovations : approfondissement de la méthode .....	96
5.4.	<i>Grille de critères pour une évaluation systémique de la pertinence des plantes transgéniques</i> .....	99

**6. Suggestions complémentaires. Intégration de l'évaluation systémique de la pertinence dans les procédures règlementaires et dans la politique scientifique.....** 103

6.1.	<i>Intégration dans les procédures règlementaires comme le protocole de Cartagène ou la Directive 2001/18?103</i>	
6.2.	<i>L'analyse systémique de la pertinence &amp; le système d'innovation large</i> .....	104
6.3.	<i>Implications pour la Politique Scientifique : suggestions pour un effort de recherché multidisciplinaire, prospectif et systémique sur les plantes transgéniques</i> .....	105
6.3.1.	Une approche multidisciplinaire et prospective des plantes transgéniques.....	105
6.3.2.	Suggestions des principes .....	106
6.3.3.	Autres sujets de recherché particuliers .....	107

## Table des figures

Figure 1: La filière du maïs en Belgique.....	8
Figure 2 : Le problème du désherbage en culture de maïs .....	10
Figure 3. La filière de la betterave en Belgique.....	43
Figure 4 : Cycle de vie de <i>P. betae</i> dans une betterave sucrière (Franc G. et al. 1993) .....	44
Figure 5 : Le problème de la rhizomanie en culture de betteraves.....	45
Figure 6 La filière de la pomme en Belgique .....	68
Figure 7 : Le problème de la tavelure en arboriculture .....	69

## Table des tableaux

Tableau 1: Principes agronomiques des stratégies principales pour le désherbage en maïs .....	12
Tableau 2 Principes agronomiques des stratégies secondaires pour le désherbage du maïs .....	14
Tableau 3 : Synthèse de l'utilisation des stratégies en désherbage du maïs .....	15
Tableau 4 : Avantages et inconvénients du désherbage chimique .....	15
Tableau 5 : Avantages et inconvénients des méthodes préventives.....	16
Tableau 6 : Avantages et inconvénients de la technique du désherbage mécanique .....	17
Tableau 7 : Avantages et inconvénients de la technique du désherbage mixte .....	18
Tableau 8 : Principes agronomiques des innovations.....	25
Tableau 9 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement du génie génétique, maïs RR. ....	30
Tableau 10 : Avantages et inconvénients des cultivars à activité allélopathique .....	31
Tableau 11 : Avantages et inconvénients ainsi que les facteurs socio-économiques de l'allélopathie.....	31
Tableau 12 : Avantages et inconvénients ainsi que les facteurs de développement des cultures de couverture et des sous-semis .....	32
Tableau 13 : Avantages et inconvénients ainsi que les facteurs de développement des herbicides naturels et dérivés.....	32
Tableau 14 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs développement de la densité de semis et modification de la largeur de l'interligne .....	33
Tableau 15 : Avantages et inconvénients ainsi que les facteurs de développement de la lutte biologique.....	33
Tableau 16 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement du désherbage thermique.....	34
Tableau 17 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement socio-économique du paillage plastique.....	34
Tableau 18 : Principes agronomiques des stratégies principales contre la rhizomanie .....	47
Tableau 19: Principes agronomiques des stratégies secondaires contre la rhizomanie .....	48
Tableau 20 : Avantages et inconvénients des variétés tolérantes.....	50
Tableau 21 : Principes agronomiques des innovations.....	55
Tableau 22 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement du Génie génétique, betteraves transgéniques résistantes à la rhizomanie. ....	59
Tableau 23 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de l'amélioration classique.....	60
Tableau 24 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de la lutte chimique .....	61
Tableau 25 : Avantages et inconvénients ainsi que les facteurs de développement de la lutte biologique.....	61
Tableau 26 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de la lutte intégrée .....	62
Tableau 27 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de l'innovation institutionnelle .	62
Tableau 28 : Principe agronomique des stratégies principales contre la tavelure .....	72
Tableau 29 : Principe agronomique des stratégies secondaires contre la tavelure .....	73
Tableau 30 : Synthèse de l'utilisation des stratégies .....	74
Tableau 31 : Avantages et inconvénients des fongicides de synthèses.....	75
Tableau 32: Avantages et inconvénients des systèmes d'avertissements .....	75
Tableau 33 : Avantages et inconvénients des méthodes préventives.....	76
Tableau 34 : Avantages et inconvénients de la résistance variétale classique.....	76
Tableau 35: Avantages et inconvénients des fongicides minéraux .....	77
Tableau 36 : Facteurs de non développement des variétés résistantes à la tavelure .....	78
Tableau 37 : Synthèse des innovations institutionnelles .....	83
Tableau 38 : Principes agronomiques des innovations.....	83
Tableau 39 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement du Génie génétique.....	86
Tableau 40 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de l'amélioration classique.....	87
Tableau 41: Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de la résistance systémique induite, RSI .....	88
Tableau 42 : Avantages et inconvénients ainsi que facteurs de développement de la lutte biologique (Champignons antagonistes).....	89

## Acronymes utilisés dans le texte

AFSCA : Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire.  
AMP : Anti-microbial peptides  
AMPA : Amino Méthyl Phosphonic Acid, dégradation du glyphosate  
ANT : Actor-network theory (théorie de l'acteur-réseau)  
ARN: Acide RiboNucléique.  
BNYVV: Beet Necrotic Yellow Vein Virus.  
BSBMV: Beet SoilBorne Mosaic Virus.  
BSBV: Beet SoilBorne pomoVirus.  
Bt: Acronyme du gène issu d'un micro-organisme naturel, le *Bacillus thuringiensis* ("Bt"), qui permet aux plantes transgéniques possédant ce gène de produire une protéine toxique pour la pyrale.  
CABC : Centre Agricole Betteraves Chicorées.  
CBB : Confédération des Betteraviers Belges.  
CIPF : Centre Indépendant de Promotion Fourragère  
CEF : Centre Fruitier Wallon (Centre d'Expérimentation en cultures Fruitières)  
COV : Certificat d'obtention végétale  
CRA : Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux  
DARE : acronyme d'un programme de recherche européen (Durable Apple Resistance in Europe)  
DIBOA : 1,4-dihydroxy-1,4-benzoxazin-3-one, allélochimiques.  
DIMBOA : 2,4-dihydroxy-7-méthoxy-1,4-benzoxazin-3-one, allélochimiques.  
FTC : Fruitteeltcentrum (département de la KUL)  
FYMY : Unité de Phytopathologie de l'UCL.  
GAWI : Groupement des Arboriculteurs pratiquant en Wallonie les techniques Intégrées  
IIRB : Institut International de Recherche Betteravière.  
IRBAB : Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave.  
ITB : Institut Technique français de la Betterave industrielle.  
KUL : Katholieke Universiteit Leuven  
MAE : Mesures agri-environnementales  
OGM : Organisme Génétiquement Modifié.  
PGM : Plante génétiquement modifiée  
PRI : Plant Research international  
RR : Roundup Ready. Acronyme pour le gène de résistance au glyphosate, matière active du Roundup inséré dans des plantes par transgénèse.  
RSI : Résistance Systémique Induite  
RT : Raffinerie Tirlemontoise.  
RT-PCR : Reverse Transcriptase – Polymerase Chain reaction.  
SAU : Superficie agricole utile  
SBB : Service de Biosécurité et de Biotechnologie.  
SUBEL : Société Générale des Fabricants de Sucre de Belgique.  
VF : Acronyme du gène de résistance principal à la tavelure

---

# Partie 1 : Introduction

*Philippe Baret et Delphine Vromman*

---

# 1. Contexte

---

## 1.1. Contexte général

A côté des potentialités agronomiques, alimentaires et environnementales offertes par la technologie des plantes transgéniques, les risques éventuels liés à leur développement préoccupent tant le public que les scientifiques. Les pouvoirs publics ont mis ou s'attèlent à mettre en place des législations réglementant leurs procédures d'autorisation, qui font appel à une évaluation scientifique des risques, comme préconisé par le Protocole international de Carthagène sur la prévention des risques biotechnologiques.

Cependant, cette évaluation des risques se focalise essentiellement sur les risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement. Par contre, la pertinence générale de cette innovation, prenant en compte notamment des critères socio-économiques plus larges et la notion de développement durable du système agricole, ne fait pas jusqu'ici partie des critères d'évaluation officiels. Pourtant, le Protocole de Carthagène (ratifié par la Belgique) invite les Parties à (art. 26 1.) « tenir compte .....des incidences socio-économiques de l'impact des organismes vivants modifiés sur la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique, eu égard à la valeur de cette diversité biologique pour les communautés autochtones et locales, en particulier ».

Une difficulté majeure pour les prendre en compte réside dans le manque de méthode permettant d'intégrer les données scientifiques, socio-économiques et éthiques de l'impact des plantes transgéniques ou de toute autre innovation agricole.

Le présent travail est une première contribution à une approche systémique de la pertinence des plantes transgéniques appliquée à trois situations dans le contexte belge : le maïs résistant aux herbicides, la betterave résistant à la rhizomanie et le pommier résistant à la tavelure.

## 1.2. Ancrage du rapport dans la dynamique de recherche

S'inscrivant dans le cadre d'un financement très limité et de courte durée, le document s'appuie sur des travaux entamés précédemment à l'Unité de Génétique de la Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale de l'Université catholique de Louvain. Gaëtan Vanloqueren y réalise sa thèse de doctorat et est à l'origine de la méthode mixte développée et a réalisé l'étude sur le pommier résistant à la tavelure. Mélanie Braibant a jeté les bases du travail sur les betteraves résistantes à la rhizomanie dans le cadre d'un mémoire de fin d'études. Dans les mêmes circonstances, Yasmina Fiasse a enquêté sur le maïs résistant à un herbicide.

## 1.3. Pourquoi une approche systémique ?

La méthode proposée est une inversion quasi complète de la logique qui prime actuellement dans le monde de l'évaluation des biotechnologies : au lieu de partir de l'innovation proposée de l'évaluer pour elle-même, nous utilisons l'innovation comme point de départ pour remonter au problème agronomique auquel cette innovation dit vouloir répondre.

Une fois le problème cerné, l'ensemble des stratégies permettant de répondre à ce problème est décrit et étudié. Ce faisant, nous ouvrons largement le champ des solutions alternatives par rapport à une question agronomique.

Cette approche systémique mise en place de façon raisonnable (6 mois ingénieur par problématique) n'aboutit pas à un produit fini de type « Voici la solution idéale pour ce problème ». Ce serait faire injure à la maîtrise des acteurs de terrain par rapport à leur objet et oublier le caractère en partie contingent du développement de l'innovation. Le produit final d'une telle étude est en fait un produit intermédiaire dans le débat public, il articule une logique technicienne basée sur des méthodes pointues mais par définition limitées à une vision très technique d'une seule stratégie d'innovation et une demande citoyenne, et donc politique, qui demande un éclairage rigoureux mais large et accessible sur l'ensemble des solutions possibles.

Cette étape intermédiaire nourrit un processus de décision mais doit être accompagné sur le long terme d'un travail d'une autre nature pour en développer les aspects techniques. Elle présente l'avantage d'éveiller la réflexion à différents niveaux : évaluation d'une solution transgénique précise (par exemple dans le cadre d'un dossier « biosécurité ») mais aussi réflexion à plus long terme sur la façon dont le public et le privé peuvent interagir dans l'émergence des innovations technologiques qui répondront de la façon la plus pertinente à une demande sociétale. Nous entendons par pertinence, la solution qui répondra au mieux à un problème sans en créer de nouveaux.

Un tel travail doit modestement contribuer à :

- une nouvelle vision du rôle des acteurs : les utilisateurs, les décideurs et la société dans son ensemble sont co-responsable des innovations qui émergent au sein du système agricole
- une modification de la séquence temporelle : les acteurs de la société civile n'étant plus confinés au rôle de juge a posteriori acceptant ou rejetant une voie d'innovation qui leur est imposée mais participant beaucoup plus en amont au choix des innovations à explorer. On rejoint une logique « upstream » qu'illustre le cas de la maladie d'Alzheimer en Grande-Bretagne.

#### **1.4. Un résultat intermédiaire et donc insatisfaisant**

Au cours de ce processus, nous sommes conscients des limites de notre méthode et de nos moyens. Le résultat est large et donc malheureusement hétérogène car nos compétences sont variables (meilleures sur les aspects génétique, plus limitées sur les dimensions phytopathologiques par exemple) et surtout le développement des différentes pistes d'innovation est très inégal. En outre, la littérature scientifique ne fait pas justice de manière équitable aux différentes logiques d'innovation.

#### **1.5. La méthode**

Ce projet a pour but d'analyser de manière systémique la pertinence de plusieurs cultures transgéniques, en travaillant au « cas par cas ».

##### **1.5.1. Définition de la notion de pertinence**

Notre projet de recherche entend par « pertinence » d'une innovation technique, sa capacité à répondre aux problèmes sans en créer de nouveaux. La pertinence d'une innovation relève de nombreuses dimensions. Les analyses se sont ciblées sur les aspects agronomiques, environnementaux et socio-économiques. La notion de pertinence dépend également du point de vue selon lequel on se place, producteurs, consommateurs, entreprises,...(Vanloqueren G, 2004).

##### **1.5.2. Analyse systémique**

Les approches systémiques ont pour objectif d'étudier les parties d'un système et leurs interactions plutôt que de se concentrer sur une seule partie isolée (Checkland P.B., 1981). Parfois décrite comme un paradigme alternatif d'analyse et d'exploration de la réalité (Bonami M., 1996), la systémique

trouve ses applications dans l'étude des systèmes vivants et sociaux. Appliquée en agronomie, elle intègre les aspects biologiques, sociaux et organisationnels ou institutionnels de l'agriculture, afin de comprendre et d'améliorer le système entier (Ison et al., 1997). Elle se concrétise par une série de principes à mettre en œuvre plutôt que par un protocole précis.

### **1.5.3. Méthodologie**

Pour chaque étude de cas, l'information provient d'une part de la réalisation d'entretiens auprès de divers acteurs du monde agricole et scientifique et d'autre part de la consultation de la bibliographie existante sur le sujet. Les interviews ont constitué le moteur de la recherche. Ils ont permis d'offrir une vision plus réaliste des enjeux entourant les différentes études de cas. Dans les études de cas où les plantes transgéniques ne sont qu'au stade de la recherche, les interviews permettent d'anticiper dans une certaines mesures le futur.

### **1.5.4. Enquête par entretiens**

Le choix de l'entretien comme type d'enquête s'impose à chaque fois que l'on ignore le monde de référence dans lequel on mène l'investigation (Blanchet A. and Gotman A., 2001). La richesse d'une enquête par entretiens réside dans le fait qu'elle vise la production d'un discours et qu'elle suscite par conséquent la réflexion à la fois chez l'interviewer et l'interviewé. Le dialogue permet également de relever des aspects essentiels de la problématique n'apparaissant pas dans la bibliographie.

Etant donné le petit nombre de personnes interrogées (entre 20 et 30 pour chaque étude), l'entretien fournit un résultat qualitatif et ne permet donc pas une inférence statistique à une population plus large comme pour le questionnaire. Certaines conclusions solides peuvent cependant être tirées, notamment en ce qui concerne l'explication des raisonnements, motivations et comportements des acteurs et la compréhension des processus dans lesquels ils s'agissent (Blanchet A. and Gotman A., 2001).

La première étape fut de définir la population à interroger, c'est-à-dire les catégories d'acteurs susceptibles de contribuer à répondre aux objectifs de recherche (Blanchet A. and Gotman A., 2001). La conduite de l'entretien s'est voulue semi-dirigée. Il s'agit d'un type de rencontre où l'acteur s'exprime librement tout en étant orienté par l'intervieweur.

## 1.6. Le canevas

Pour chaque étude de cas, nous avons suivi un plan identique. Cela facilite les comparaisons et nous permet de vérifier la cohérence globale. Cela crée aussi des problèmes car l'ensemble des dimensions n'est pas toujours couvert avec la même profondeur pour toutes les innovations. Différents figures et tableaux sont systématiquement présentés pour chaque cas.

- **La problématique**

- La description du problème

En partant du contexte de la culture et des logiques d'acteurs, le problème technique est identifié.

- 1.1 La culture

- 1.2 La filière

- Figure : Les acteurs de la filière

- 1.3 Le problème technique

- Figure : Description du problème

- Les implications du problème

Les conséquences du problème sont développées successivement pour les aspects agronomiques, environnementaux, de santé publique et socio-économiques.

- **Les stratégies de lutte actuelles**

Une stratégie est une méthode de lutte qui existe actuellement et est utilisée ou non par les producteurs. Les stratégies sont soit curatives soit préventives. Les stratégies « principales » sont celles qui sont « principalement » utilisées par les producteurs en agriculture conventionnelle. Les stratégies « secondaires » sont celles qui sont très peu considérées dans la filière...et donc peu utilisées.

- Tableau : Principe agronomique des stratégies principales

- Tableau : Principe agronomique des stratégies secondaires

- **Les voies d'innovation**

Les voies d'innovation reprennent des techniques non utilisées actuellement mais en voie de développement. Le génie génétique est traité séparément.

- Tableau : Principes agronomiques des innovations

- **Liens entre innovations et filière**

Dans quelle mesure, les filières pourront-elles intégrer les innovations ?

- Tableau : Facteurs positifs des innovations

- Tableau : Facteurs négatifs des innovations

---

Partie 2 : Les trois études de cas  
Le désherbage en maïs, la rhizomanie en  
betteraves, la tavelure en pommier

*Delphine Vromman et Philippe Baret*

---

## 2. Evaluation systémique de la pertinence du maïs transgénique RR <sup>1</sup>

---

**Résumé** - Pour avoir un bon rendement en maïs qui assurera une ration alimentaire suffisante pour le bétail, un désherbage est nécessaire et doit se réaliser, en fonction des conditions climatiques, entre le semis (fin avril) et avant le stade huit feuilles visibles (mi-juin). L'atrazine herbicide de la famille des triazines, homologuée en 1959, n'a cessé de démontrer son efficacité dans le désherbage sélectif du maïs. Cette molécule utilisée depuis des décennies permettait en effet, un désherbage du maïs sélectif, simple, efficace ainsi que peu coûteux et dans la plupart des cas en un seul passage. Toutefois, l'Europe a décidé de l'interdire, le 10 mars 2004. Son interdiction remet en question les techniques de désherbage en culture de maïs.

Actuellement, en Belgique, la terbuthylazine en co-formulation est la matière active recommandée en remplacement à l'atrazine. Moins rémanente, plus chère et ayant un spectre d'action moins complet que l'atrazine, elle permettra cependant un désherbage efficace en co-formulation avec les produits adéquats. Le désherbage chimique conventionnel se basera plus que jamais sur des mélanges de matières actives et les stratégies en deux passages risquent d'augmenter.

D'autres techniques de désherbage du maïs sont utilisées en Belgique comme le désherbage mixte présente de réels atouts dans le cadre de la politique pour la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Cependant, les contraintes d'ordre technique, météorologique, et économique limitent l'adoption de ces stratégies par les agriculteurs.

A moyen terme, une autre solution pour le désherbage du maïs résidera peut-être dans l'utilisation du maïs transgénique résistant au Roundup, maïs RR. Celui-ci ne modifie pas en profondeur les pratiques du désherbage conventionnelles. Les avantages économiques, la simplicité et la flexibilité du système sont les principaux intérêts perçus par le monde agricole belge. La compatibilité de la technique avec les pratiques de travaux simplifiés du sol et la possibilité d'un nouvel outil pour lutter contre les adventices sont d'autres avantages qui pourraient favoriser son adoption.

Cependant, des inconvénients existent également : la non-rémanence du glyphosate nécessitera l'utilisation de plusieurs produits et/ou traitements ainsi qu'une augmentation de la quantité d'herbicides. Des craintes persistent quant à l'efficacité à long terme, aux impacts sur la coexistence des cultures et à l'indépendance des agriculteurs. De plus, la dépendance de cette technique pour une unique molécule ne permet pas un changement vers une moindre dépendance de l'agriculture pour les solutions chimiques et pourraient entraîner les mêmes conséquences sur l'environnement que les traitements chimiques conventionnelles.

A long terme, d'autres voies d'innovation en développement actuellement comme l'allélopathie<sup>2</sup> seront peut-être utilisées. La littérature scientifique des dix dernières années montre un intérêt croissant pour l'allélopathie. L'influence des densités de semis et la largeur de l'interligne ainsi que la lutte biologique par l'utilisation d'insectes se nourrissant des adventices ou de champignons et de bactéries parasites des adventices, constituent d'autres voies d'innovation pour influencer négativement le développement des mauvaises herbes, mais elles ne rencontrent pas le même engouement en recherche. A long terme, la plupart de ces innovations devront s'intégrer dans une réflexion du désherbage à l'échelle du système basée probablement sur une combinaison de stratégies.

---

<sup>1</sup> Cette étude de cas se base essentiellement sur le travail original de Jasmina Fiasse (Fiasse J., 2005).

<sup>2</sup> L'allélopathie a été définie selon Rice (1984) comme « l'effet d'une plante (incluant un microorganisme) sur une autre plante grâce à la production et la libération d'un (plusieurs) composé(s) chimique(s) dans l'environnement »

## 2.1. La problématique : Désherbage du maïs

### 2.1.1. Description du problème

#### a. La culture

A l'échelle de la Belgique, les surfaces sous maïs comptent 12% de la Superficie Agricole Utile au recensement de 2004 (Institut National de Statistiques, 2004). La majorité de la production belge est consommée au sein des exploitations qui la produisent comme nourriture pour le bétail. Cette culture ne représente jamais la principale production au sein d'une exploitation. Toutefois, le maïs représente la seconde culture fourragère après les prairies. En effet, la culture de maïs est bien valorisée par les bovins. Cet aliment influence la production laitière ainsi que la production de viande et participe ainsi au revenu de l'agriculteur.

#### b. La filière du maïs

L'autoconsommation du maïs au sein des exploitations a pour conséquence que le nombre d'acteurs impliqués dans la filière du maïs en Belgique est peut être plus restreint que dans le cas d'autres grandes cultures (Figure 1). Les agriculteurs bénéficient d'un double encadrement, aussi bien par les associations de conseils (CIPF) et par les négociants en produits agricoles.

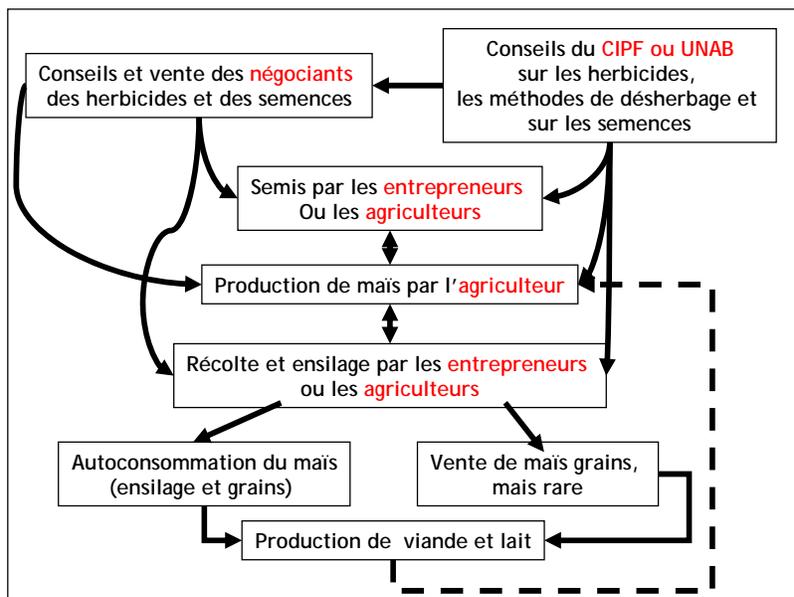


Figure 1: La filière du maïs en Belgique

#### c. Le problème technique : le désherbage

Par sa grande exigence en température, le maïs se développe lentement au début de sa saison culturale. En conséquence, sa compétitivité est faible vis à vis des adventices qui le privent d'eau, de nutriment et de lumière. Il a été estimé que la compétition par les adventices non contrôlées peut causer 30 à 90% de pertes de rendement (Hamill A.S. and Zhang J.,1997). Un désherbage est donc nécessaire et doit se réaliser, en fonction des conditions climatiques, entre le semis (fin avril) et avant le stade huit feuilles visibles (mi-juin). En effet, passé ce stade, la grande taille de la plante et l'étalement important des feuilles rendent le passage des machines difficile. Le désherbage est pratiquement le seul poste phytosanitaire pour la culture du maïs, en Belgique.

Comme le maïs ne rapporte économiquement que via la production bovine, le désherbage doit être bien fait et ne pas avoir un coût trop élevé afin d'assurer une ration alimentaire suffisante pour le bétail. L'atrazine, herbicide de la famille des triazines<sup>3</sup>, homologuée en 1959, a montré son efficacité dans le désherbage sélectif du maïs. En effet, son spectre d'action contre les adventices est large. La forte rémanence ainsi que la grande mobilité de cette molécule permettent d'avoir une action prolongée tout au long de la saison de culture. C'est la raison pour laquelle, dans la plupart des cas, le désherbage se réalise en un seul passage après levée du maïs mais à des stades de développement différents. Moins de 25% des traitements se réalisent en pré-semis ou pré-émergence avec un second passage de rattrapage en post-émergence (Ledent JF, 2003). Par ailleurs, l'atrazine possède une grande sélectivité pour le maïs, même lorsqu'il est appliqué à doses élevées. Le dernier avantage de l'atrazine et non le moindre, réside dans son faible coût.

Sur base de ses nombreuses qualités, l'atrazine a été utilisée massivement. Cette utilisation intensive de l'atrazine, dans le secteur agricole ou non agricole<sup>4</sup> depuis quatre décennies et les propriétés physico-chimiques de cette substance active (haute solubilité, faible adsorption sur les particules du sol et dégradation lente) ont entraîné la contamination des eaux souterraines et des eaux de surfaces. Les teneurs en atrazine décelées dans les eaux s'est révélée être souvent supérieures aux normes européennes<sup>5</sup>. En 2000, 27% et 32% des captages, en France, ont révélé des valeurs en atrazine et de son métabolite (DEA), supérieures aux normes légales, (soit 0,1 µg/l) (Sénat français, 2005). La décision de la Commission Européenne rendue le 10 mars 2004, a été d'interdire complètement son utilisation. Les autorisations pour les produits contenant de l'atrazine ont du être retirées au plus tard pour le 10 septembre 2004 dans la plupart des Etats Membres, bien que l'écoulement des stocks soit permis jusque septembre 2005. Dès juin 2002, la Belgique a interdit les produits dont la seule substance active était l'atrazine en autorisant toutefois les co-formulations.

---

<sup>3</sup> Les triazines et leurs métabolites : déisopropylatrazine (DIA), dééthylatrazine (DEA), simazine, atrazine, terbutylazine et terbutryne.

<sup>4</sup> Le secteur agricole n'est pas le seul responsable des contaminations des eaux par des herbicides. En effet, l'utilisation sur des surfaces imperméables dans le secteur non agricole est responsable en grande partie des contaminations de l'atrazine dans les eaux.

<sup>5</sup> Les limites de concentrations fixées par l'Union européenne pour l'eau potable (soit 0,1 µg de substance par litre d'eau) sont vingt fois plus sévères que le taux fixé par l'Organisation Mondiale de la Santé (2 µg/l) et deux cents fois plus sévères que le taux fixé en Australie.

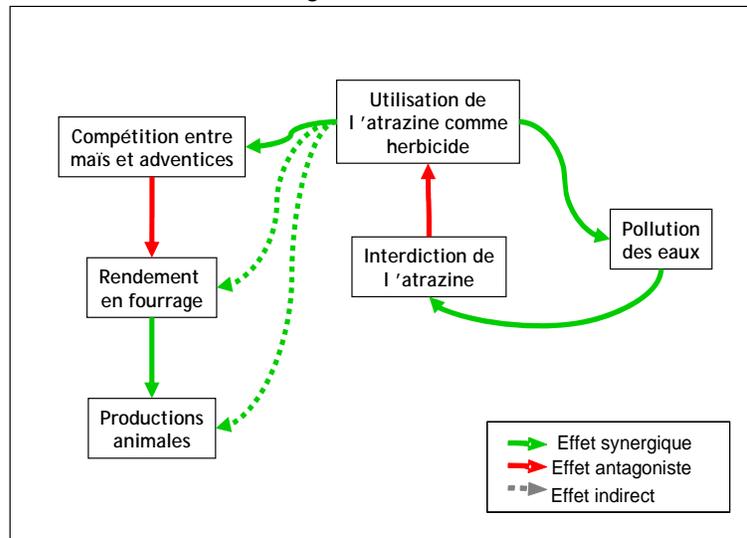


Figure 2 : Le problème du désherbage en culture de maïs

### 2.1.2. Les implications

#### a. Implications agricoles

Suite à la suppression complète de l'atrazine, les schémas de traitement s'orientent vers l'association de plusieurs matières actives et de produits pour contrôler un spectre relativement large d'adventices.

**Les producteurs** devront combiner différentes matières actives pour résoudre les problèmes observés en champs. Ce qui nécessitera plus de technicité. La nécessité de traiter en deux fois pourrait augmenter, engendrant une augmentation de la charge de travail.

**Les négociants** aussi devront s'adapter à cette nouvelle demande. Ils devront se former et s'informer sur les nouveaux produits, afin d'avoir une connaissance parfaite de tous les produits sur le marché.

**Les associations de conseils** devront réorienter leurs essais liés au désherbage en maïs avec les différents produits sur le marché. La sélectivité des mélanges vis-à-vis des cultures ne peut être évaluée que par des essais en conditions pratiques, d'où l'importance du travail réalisé par ce type d'association qui effectue des recherches indépendantes. Ils devront également prévoir du personnel pour répondre aux questions des agriculteurs et des négociants.

#### b. Implications économiques

**Pour les producteurs**, le désherbage sans atrazine aura un coût supérieur, à cause d'un prix d'achat des produits et d'un nombre de passages nécessaires qui sont plus élevés.

L'interdiction de l'atrazine crée une demande pour de nouveaux herbicides. Cela devrait favoriser **les entreprises** les plus innovantes.

### **c. Implications environnementales :**

- ***Pour la filière***

Les acteurs craignent également un changement de la flore adventice. Des problèmes classiques pourraient revenir. Notamment, on s'attend à ce que des adventices facilement maîtrisées par l'atrazine, comme les renouées ou les mercuriales, posent à nouveau problème en champ. Déjà avec l'atrazine, suite à des années d'utilisation, un certain nombre de cas de résistance sont apparus au sein de la flore adventice. Ces résistances sont à prendre en sérieux, surtout dans la mesure où il s'agit généralement de résistances croisées pour toute la famille des triazines. La terbuthylazine, faisant également partie de la famille des triazines et étant proposée en solution à l'atrazine ne résout donc pas ce problème de résistance.

- ***Pour la faune et la flore aquatique***

La pollution des eaux par l'atrazine modifie le biotope aquatique et crée ainsi divers problèmes. L'atrazine a un effet inhibiteur sur les plantes aquatiques. La dose létale<sup>6</sup> de l'atrazine est très élevée<sup>7</sup>.

L'interdiction de l'utilisation de l'atrazine va diminuer ses teneurs dans les eaux, même si l'atrazine et ses métabolites se dégradent lentement. Le retrait de l'atrazine est, donc, bénéfique pour le milieu aquatique. De plus, le terbuthylazine, matière active recommandée en remplacement à l'atrazine est moins soluble dans l'eau. Cette propriété réduit donc les risques de sa présence dans l'eau (Foucart G. et al., 2004).

Toutefois, l'utilisation d'autres matières actives<sup>8</sup> en remplacement à l'atrazine pour le désherbage restera néfaste pour l'environnement, même si celles-ci sont moins solubles dans l'eau, moins mobiles ou moins rémanents. En effet, l'utilisation de produits phytosanitaires, a toujours un impact, même minime, sur l'environnement et les organismes vivants. Les herbicides sont des produits phytosanitaires qui posent beaucoup de problèmes au niveau de la contamination des eaux.

- ***Implications sur la santé humaine***

L'application de tous produits phytosanitaires présente un risque pour la santé de celui qui l'applique. Le produit peut contaminer par inhalation ou par contact avec la peau et les yeux.

Pour l'homme, l'atrazine est classé comme « produit nocif<sup>9</sup> ». Cette nocivité se manifeste après inhalation ou contact dermique. Les effets à long terme sur la reproduction sont suspectés. En revanche, l'atrazine a été classé non cancérigène par le Centre international de recherches sur le cancer en 1998.

La contamination des eaux de captage par de l'atrazine peut poser des problèmes. En effet, les risques d'effets graves apparaissent en cas d'exposition prolongée par ingestion.

**L'interdiction de l'atrazine remet en question les stratégies de désherbage en culture de maïs.**

---

<sup>6</sup> Dose létale est la dose nécessaire pour tuer 50 % d'animaux témoins

<sup>7</sup> Entre 750 et 4.000 mg d'atrazine par kilo de poids d'animal ou d'oiseau (lapin : 750 mg, faisan : 2.000 mg, rat ou souris : 1.700 - 4.000 mg). (Sénat français, 2005)

<sup>8</sup> Ces autres molécules sont bentazone, clopyralid, diméthénamide, s-metolachlore, nicosulfuron et fluroxypyr

<sup>9</sup> La dose journalière acceptable est de 40 µg/kilo de poids corporel. (Sénat français, 2005)

## 2.2. Stratégies de lutte actuelles

### 2.2.1. Description des stratégies

On considère deux types de stratégies. Les stratégies « principales » sont celles qui sont « principalement » utilisées par les producteurs en agriculture conventionnelle. Les stratégies « secondaires » sont celles qui sont très peu considérées dans la filière traditionnelle.

#### a. Stratégies principales

- **Désherbage chimique**

La matière active recommandée en remplacement à l'atrazine est la terbuthylazine, famille des triazines. Cette molécule possède un spectre d'action relativement comparable à celui de l'atrazine à même dose ainsi qu'une bonne efficacité contre les adventices jeunes. Par ailleurs, cette matière active présente un effet de synergie comparable à l'atrazine si elle est utilisée en mélange avec deux molécules de la famille des tricétones, le sulcotrione ou le mésotrione (Foucart G. et al., 2004). Cette molécule sera donc utile pour maintenir un désherbage en un seul passage après le retrait de l'atrazine (Foucart G. et al., 2004). Toutefois, l'efficacité de la terbuthylazine est moindre contre les matricaires et le ray-grass et son coût est plus élevé par rapport à l'atrazine. Depuis 2005, elle n'est plus utilisée qu'en association. Les autres matières actives proposées également depuis quelques années en remplacement de l'atrazine dans les cultures de maïs sont le bentazone<sup>10</sup>, dicamba, bromoxynil pyridate, clopyralid, diméthénamide, s-metolachlore, nicosulfuron et fluroxypyr... et la famille d'herbicides, les tricétones (le sulcotrione, le mésotrione) (Foucart G. et al., 2005; Fytoweb, 2005). A l'heure actuelle, les schémas de traitements pour le désherbage en culture de maïs se réalisent tous en utilisant des mélanges de matières actives et/ou de produits.

Tableau 1: Principes agronomiques des stratégies principales pour le désherbage en maïs

Stratégie principale	Principe agronomique
Désherbage chimique sans atrazine	Associations de différentes molécules chimiques qui détruisent les adventices en cultures de maïs sans avoir un impact sur le maïs

#### b. Stratégies secondaires

Ces méthodes de lutte actuelles peuvent être préventives ou curatives.

- **Méthodes préventives**

- Travaux du sol

→ Le labour

L'effet principal du labour, dans l'objectif de la lutte contre les adventices, est d'enfouir les graines de mauvaises herbes prêtes à germer à une profondeur à laquelle elles ne pourront plus germer.

→ Les faux-semis

La technique du faux-semis a comme objectif d'éliminer les graines prêtes à germer avant la culture en préparant le sol au semis. La préparation du sol commence quelques jours ou quelques semaines avant d'implanter la culture. Ceci produit un épuisement de la banque de graines du sol dans la partie superficielle du sol et réduit ainsi l'émergence postérieure d'adventices. Pour qu'elle ait un effet

<sup>10</sup> Famille benzothiadiazole (Absorption foliaire. Aucune translocation.)

concluant, il faut que la culture soit implantée après que la vague principale d'émergence des adventices ait eu lieu et que le travail du sol ne soit pas trop profond<sup>11</sup>. En effet, un travail du sol en profondeur aura pour effet de remonter en surface des graines en dormance qui germeront donc au début de la culture. Les adventices germées doivent ensuite être détruites, par un nouveau travail du sol deux à trois semaines après le faux semis et juste avant le semis de maïs (Bond W. and Grundy A.C., 2001). Le faux semis peut être répété plusieurs fois. On l'utilise surtout au printemps, avant les cultures semées assez tard (CARAB asbl, 2005).

- Rotations

La succession de cultures utilisant différents modèles de compétition des ressources, l'interférence par allélopathie<sup>12</sup> et la perturbation du sol par l'intensité du travail mécanique produisent un environnement instable qui permet d'éviter la prolifération et la dominance d'un certain type d'avertices comme la mercuriale (Liebman M. and Davis A.S., 2000).

- Intercropping

L'«intercropping» est un système dans lequel une seconde culture est plantée en association avec une culture primaire, le maïs (Hatcher P.E. and Melander B., 2003). L'«intercropping» recouvre les notions de cultures de couverture et de sous-semis.

La **culture de couverture** est mise en place entre deux cultures. Les deux cultures de couverture les plus utilisées en Wallonie après la récolte du maïs sont le seigle (*Secale cereale*) et le raygrass italien (*Lolium multiflorum*). D'autres cultures peuvent être semées comme la moutarde, phacélie, les radis oléifères.

Le **sous-semis** consiste à planter une culture secondaire comme du ray-grass, fétuque, trèfle,..., pendant la saison de culture du maïs dans l'interligne (40cm) de celui-ci et en la conservant au-delà la récolte de cette culture. Le sous-semis va rentrer en compétition avec les adventices se trouvant sur l'interligne. La date d'implantation de la culture dérobée sera fonction de la vitesse d'installation de l'espèce implantée. Dans tous les cas, il faudra veiller à ne pas l'implanter trop tôt afin de ne pas concurrencer le maïs, ni trop tard afin d'éviter que la fermeture des lignes de maïs n'empêche le sous couvert de s'implanter (par exemple, une semis de ray-grass au stade 6-8 feuilles du maïs rencontre ce compromis).

- **Méthodes de lutte**

- Désherbage mécanique

La technique du désherbage mécanique se réalise en combinant différentes méthodes telles que le buttage sur la ligne ainsi que le binage de l'interligne à la herse étrille ou à la bineuse. Plusieurs passages sont nécessaires pour assurer un désherbage correct. Le désherbage manuel ainsi que les méthodes préventives peut également être utilisé en complément d'un désherbage mécanisé (Bond W. and Grundy A.C., 2001).

Le choix du matériel, le moment d'application et la fréquence dépendent de la morphologie de la culture et des adventices (Bond W. and Grundy A.C., 2001). En général, ces outils sont utilisés à un

---

<sup>11</sup> Le faux-semis est très importante en maraîchage et en grande culture pour les cultures sarclées Pour être les plus efficaces, les faux semis doivent être superficiels pour obtenir une couche de sol en surface pauvre en semences viables. Les graines de mauvaises herbes ne peuvent germer qu'en surface. La herse étrille est un outil idéal pour les faux semis. Elles ne travaillent qu'en surface et ne remontent donc pas les graines, elle permet aussi un travail rapide tout en limitant le tassement du sol vu sa grande largeur (CARAB asbl, 2005).

<sup>12</sup> L'allélopathie : l'effet d'une plante sur une autre plante grâce à la production et la libération de divers composés chimiques dans l'environnement (Rice E.L., 1984)

stade précoce de développement de la culture. En effet, les méthodes de contrôle mécaniques deviennent difficiles au-delà du stade cotylédon des adventices, et leur sélectivité diminue avec la croissance de la culture et l'âge des adventices (Hatcher P.E. and Melander B., 2003).

○ Désherbage mixte

Cette technique de désherbage associe un traitement chimique, localisé sur la ligne, et un désherbage mécanique dans l'interligne et se réalise à l'aide d'une bineuse équipée d'un système de pulvérisation localisé à jets orientés. Un sous-semis pour la couverture des interlignes peut également être envisagé. Deux binages sont recommandés. Le premier binage se réalise au stade deux à trois feuilles et est accompagné d'un traitement chimique localisé sur la ligne. Le deuxième passage est réalisé au stade sept à huit feuilles avec un éventuel traitement chimique.

**Tableau 2 Principes agronomiques des stratégies secondaires pour le désherbage du maïs**

Stratégies secondaires	Principes agronomiques
Méthodes préventives 1. Travaux du sol ➤ Le labour ➤ Les faux-semis 2. Rotation 3. Intercropping	Changement de l'environnement du sol afin de diminuer le développement des adventices ainsi que la quantité de graines des adventices
Désherbage mécanique	Binage de l'interligne à la herse étrille ou à la bineuse et buttage sur ligne
Désherbage mixte	Association d'un traitement chimique, localisé sur la ligne et d'un désherbage mécanique sur l'interligne

**2.2.2. Etats des lieux de l'utilisation des stratégies**

Dans ce paragraphe, trois types d'agriculture seront distingués:

- l'agriculture conventionnelle
- l'agriculture raisonnée : un mode de culture et d'élevage dont l'objectif premier est de **réduire** la quantité de substances chimiques utilisées, et de **minimiser** leur impact sur l'environnement
- l'agriculture biologique : évite totalement les pesticides et engrais chimiques de synthèse. Les surfaces cultivées en bio en 2003 concernent 2,7% de la SAU en Wallonie (MRW, 2004)

**Le désherbage chimique** est utilisé en agriculture conventionnelle et en agriculture raisonnée.

**Les méthodes préventives** sont utilisées en association avec le désherbage mécanique, en agriculture biologique. En agriculture biologique, le contrôle des adventices doit être pensé pour l'ensemble du système de production : la prévention est donc également très importante. Les méthodes préventives peuvent également être utilisées en agriculture raisonnée en association avec le désherbage chimique.

Le **désherbage mécanique** est utilisé principalement en agriculture biologique et dans certains cas en agriculture raisonnée. Les surfaces de maïs cultivées en agriculture biologique contrôlées et certifiées par Ecocert pour la Région Wallonne en 2004 sont de 202 ha de maïs ensilage, soit moins de 0.5% des surfaces cultivées de maïs en Région Wallonne et de 8,5 ha pour le maïs grain (Bioforum Wallonie, 2005). Le désherbage mécanique s'accompagne souvent des méthodes préventives.

Le **désherbage mixte** n'est utilisé qu'en agriculture raisonnée. Le désherbage mixte s'inscrivait dans le cadre du programme régional des mesures Agri-Environnementales avant la révision du programme en 2004. La superficie engagée sous contrat dans ce programme en Belgique était de 471 ha en février 2002 (MRW, 2003). L'arrêté ministériel voté le 28 octobre 2004 a revu le programme des mesures Agri-Environnementales et n'a pas repris la mesure favorisant le désherbage mixte du maïs car, le service de paiements des aides ne voulait plus soutenir des mesures pour lesquelles l'adhésion restait faible (+/-1%) (MRW 2004; MRW-DGA 2005).

**Tableau 3 : Synthèse de l'utilisation des stratégies en désherbage du maïs**

Stratégies	Agriculture conventionnelle	Agriculture raisonnée	Agriculture biologique
Désherbage chimique	xxx	xx	interdit
Désherbage mixte	0	xxx	interdit
Désherbage mécanique	0	xx	xxx
Méthodes préventives	x	xx	xxx
Faux-semis	0	?	xxx
Culture de couverture	xx	xxx	?
Labour	xx	xx	xxx
Sous-semis	0	xx	?

xxx : très fréquent ; xx : fréquent ; x : peu fréquent ; 0 : rare ; ? : pas de données

### **2.2.3. Avantages et inconvénients des différentes stratégies**

#### **a. Désherbage chimique**

Les herbicides présentent l'avantage d'être efficaces pour le désherbage sélectif en culture de maïs. De plus cette efficacité dure toute la saison de culture. Le nombre de passages ainsi que le temps de passage est moindre par rapport aux autres méthodes. De même, la période de traitements se déroulant entre fin avril à début juin est assez longue. Le matériel utilisé peut servir à d'autres cultures. L'investissement du matériel est donc vite amorti. Les pulvérisations sont des techniques utilisées fréquemment en agriculture conventionnelle et elles demandent donc moins de technicité.

Toutefois, le désherbage chimique présente un risque d'obtenir des adventices résistantes. De plus, comme pour tous les produits phytopharmaceutiques, leur bonne réalisation dépendent des conditions météorologiques. Par ailleurs, cette technique a un effet négatif sur l'environnement et la santé humaine. Et par conséquent, les pulvérisations sont mal vues par l'opinion publique.

**Tableau 4 : Avantages et inconvénients du désherbage chimique**

Avantages	Inconvénients
Efficace pendant toute la saison culturale	Pollution des eaux souterraines
Temps de passage court	Mal vu par l'opinion public, impact sur la santé
Nombre de passages faibles	Problème de résistance
Utilisé en agriculture conventionnelle depuis toujours	Jongler avec différentes matières actives
Période d'application plus longue	Tributaires également des conditions météorologiques

## b. Méthodes préventives :

Les méthodes préventives comme le labour et le faux-semis n'utilisent pas de produits chimiques et ont donc un impact positif sur l'environnement. Ces méthodes, principalement la culture de couverture présentent des effets positifs sur d'autres facteurs que les adventices comme la fertilisation et l'érosion<sup>13</sup>.

Ces méthodes n'ayant qu'une faible efficacité, elles doivent être accompagnée d'une méthode de lutte comme le désherbage mixte ou mécanique. De même, la bonne réalisation de ces techniques est exigeante en temps, en énergie fossile et en main d'œuvre et cela engendre un coût et une charge de travail important. Ces pratiques demandent une grande technicité et peuvent avoir des effets négatifs si elles sont réalisées dans de mauvaises conditions<sup>14</sup>.

**Tableau 5 : Avantages et inconvénients des méthodes préventives**

Avantages	Inconvénients
Pas d'utilisation de produit phytosanitaire Impact positif pour la biodiversité Impact positif pour l'environnement	Nombre de passages ↑ énergie fossile et main-d'œuvre ↑ coût
Effet positif sur l'érosion et la fertilisation	Augmentation de la charge de travail
Développement d'une agriculture durable	Efficacité faible
Approche différente, à l'échelle du système de l'exploitation	Nécessité d'être en association avec d'autres méthodes de lutte
	Faible flexibilité (conditions climatiques)
	Haute technicité (conduite des machines)

## c. Désherbage mécanique :

Le grand avantage de cette méthode est de permettre un désherbage relativement efficace en culture de maïs sans utiliser des produits chimiques.

Par rapport aux méthodes conventionnelles, un nombre de passages plus élevé et un temps nécessaire à chaque passage plus long augmentent le **coût** de main-d'œuvre et de fuel et la charge de travail. Le coût de cette technique est encore augmenté par l'investissement dans l'achat d'une bineuse qui ne peut être utilisée que pour ce travail. De plus, ces techniques sont tributaires des **conditions climatiques**. Quant à l'efficacité de la technique, la lutte contre certaines espèces adventices pourrait présenter des limites. C'est notamment le cas avec des espèces vivaces telles que le liseron, qui se reproduisent végétativement grâce à son important réseau de rhizomes. Comparé à certains herbicides chimiques, **le contrôle mécanique ne permet pas un contrôle pendant l'entièreté de la saison de culture**. Il peut donc s'ensuivre des levées ultérieures de mauvaises herbes qui ne seront pas traitées, et qui pourront finalement réalimenter la banque de graines.

<sup>13</sup> Par exemple, l'inclusion dans la rotation d'une culture de couverture qui, en plus de contrôler des mauvaises herbes, limite l'érosion et maintient la fertilité.

Les méthodes préventives demandent de réfléchir à long terme. En effet, dans la rotation, le choix pour une culture va déterminer à la fois le problème actuel et le problème futur d'adventices dans la parcelle.

<sup>14</sup>L'influence de la fertilisation peut favoriser l'émergence des adventices en fin de saison, qui peuvent contribuer à réalimenter la banque de graines du sol (Barberi P., 2002)

**Tableau 6 : Avantages et inconvénients de la technique du désherbage mécanique**

Avantages	Inconvénients
Pas d'utilisation de produit phytosanitaire ⇒ Impact positif pour la biodiversité ⇒ Impact positif pour l'environnement	Nombre de passages ⇒ Augmentation de l'énergie fossile, main-d'œuvre et donc des coûts
Pas de dépendance à des produits chimiques	Augmentation de la charge de travail
Développement d'une agriculture durable	Efficacité réelle à long terme ?
Approche différente, à l'échelle du système de l'exploitation	Faible Flexibilité (conditions climatiques)
	Demande une technicité importante (conduite des machines)

#### **d. Désherbage mixte**

Le désherbage mixte présente des avantages environnementaux importants, d'autant plus dans le contexte du plan de réduction des pesticides en agriculture. Cette mesure **réduit les doses** d'herbicides appliquées et n'utilise pas les triazines<sup>15</sup> qui constituent la classe de matière active la plus souvent détectée dans les échantillons d'eaux souterraines<sup>16</sup>. Cette technique permet l'aération du sol et limite l'évapotranspiration de l'eau, ce qui peut être particulièrement intéressant les années sèches.

Le chantier de binage est un frein à l'adoption de la mesure par le **temps**<sup>17</sup> nécessaire à traiter une parcelle. La conduite du tracteur et la compatibilité entre les lignes et l'interligne désherbé demande une grande **technicité** pour éviter le déchaussement de la culture. Cette technique est fortement dépendante des **conditions météorologiques**, d'autant plus que les deux passages doivent être effectués en l'espace de deux ou trois semaines (Grosjean E., 1999). Les conditions de trop forte humidité limitent le passage des machines et les travaux du sol. Il doit aussi faire suffisamment sec pour permettre l'efficacité du traitement et le desséchage des adventices déchaussées.

Cette technique, s'inscrivant dans le cadre de MAE, permettait de recevoir des subsides de la région Wallonne lors de son utilisation. Mais, cette technique possédait également les inconvénients des MAE à savoir une charge de travail supplémentaire pour des raisons administratives, des retards de paiements dans certains cas et des contrôles.

<sup>15</sup> Le MAE exigeait de ne pas utiliser un herbicide de la famille des triazines

<sup>16</sup> Les triazines et leur métabolites (DIA, DEA) sauf pour la tebutylazine et le DIA sont fréquemment détectées dans les eaux. De plus, ils sont cités dans la liste des cinquante pesticides vendus dans des quantités supérieures à 500 tonnes par an en Europe. La terbutylazine, suite à l'interdiction de l'emploi de l'atrazine, entre dans le mélange utilisé pour son remplacement sur les cultures de maïs et a donc été ajouté à cette liste. Malgré son interdiction d'emploi, l'atrazine et deux de ses métabolites, la DEA et la DIA reste toujours détectée dans les eaux.

<sup>17</sup> Les fiches techniques réalisées par Agrenwal indiquent que le rendement horaire : une bineuse quatre rangs pourra réaliser 1ha/h au premier passage et une moyenne de 1,2 ha/h au second passage, une bineuse huit rangs permettra de travailler 2,4 ha/h et 3,4 ha/h au premier et deuxième passage respectivement. (Agrenwal Asbl, 2005)

**Tableau 7 : Avantages et inconvénients de la technique du désherbage mixte**

Avantages	Inconvénients
Diminution de minimum 60% de la quantité d'herbicides	Technicité (choix des produits, conduite de la machine)
=> économie d'herbicide	Investissement en matériel élevé
=> impact positif sur la faune et la flore sauvage	Temps nécessaire élevé
=> impact positif sur l'environnement (eau et structure du sol)	Flexibilité (dépendance des conditions météorologiques)
Impact positif sur la culture, en particulier certaines années (conditions climatiques)	Doit faire l'objet de promotion importante et probablement d'un soutien financier
Approche différente dans la gestion du problème	Efficacité réelle à l'échelle de la rotation ?
=> développement d'une agriculture durable	
Subsides : aides financières	Contraintes des MAE : administratives et réglementaires

#### **2.2.4. Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées**

##### **a. Méthodes préventives :**

La faible utilisation de ces méthodes s'expliquent par leurs désavantages (nombre de passages, efficacité,..) et par la nécessité qu'elles soient accompagnées d'autres méthodes de lutte comme le désherbage chimique ou mécanique due à leur faible efficacité sur les adventices.

##### **b. Désherbage mécanique :**

Les raisons de la faible utilisation du désherbage mécanique est majoritairement du au **temps** investi ainsi que le coût qui sont beaucoup plus importants qu'en désherbage conventionnelle, rendant cette technique difficilement viable économiquement dans l'agriculture conventionnelle. Le désherbage mécanique, n'utilisant pas de produits chimiques de synthèse est une des seule méthode pouvant être utilisé par la filière du biologique.

D'après Bond W. and Grundy A.C (2001), le principal facteur limitant la conversion à l'agriculture biologique concerne les appréhensions des agriculteurs conventionnels quant à la gestion des adventices sans le recours aux herbicides.

##### **c. Désherbage mixte :**

L'investissement dans un matériel spécifique a été un frein à l'adhésion au désherbage mixte, de même que l'influence des conditions climatiques dans la réussite du programme. De plus, la rigidité du programme (interdiction d'utiliser des herbicides de la famille des triazines) faisait craindre aux agriculteurs des problèmes d'adventices en cas de mauvaise année. Ces nombreuses contraintes de cette pratique (Tableau 7) sont probablement responsables de la faible adhésion des agriculteurs à cette mesure et de sa non-reprise dans le programme révisé des mesures agri-environnementales. Ce type de désherbage, utilisant des herbicides de synthèse ne peut pas être utilisé en agriculture biologique. Par ailleurs, sans aide financière, l'utilisation de cette technique n'est économiquement pas concevable en agriculture conventionnelle et tentera donc de disparaître.

## 2.3. Les innovations

### 2.3.1. Description des innovations

#### a. Génie génétique :

Dans la littérature, on peut envisager deux types de maïs transgéniques. Seul, le maïs transgénique RR est abordé en profondeur.

- Le maïs transgénique RR, résistant au Roundup
- Le maïs Liberty Link commercialisé par Bayer Crop Science, maïs résistant à l'herbicide Liberty (pour mémoire)

Le maïs RR et Liberty Link sont déjà commercialisés aux Etats-Unis.

- **Le maïs transgénique RR, résistant au Roundup :**

- Principe agronomique

Le maïs transgénique RR est un maïs qui est résistant au glyphosate, par l'insertion d'un gène<sup>18</sup>. Le glyphosate est la matière active de l'herbicide Roundup, marque déposée de Monsanto et qui a été commercialisé à partir de 1972. Le Roundup est un herbicide foliaire non sélectif, systémique et à large spectre. L'action du glyphosate au sein de la plante s'exerce au niveau de la voie métabolique, essentielle à la fabrication des acides aminés aromatiques (phénylalanine, tyrosine, tryptophane) chez la plante. Le Roundup est actuellement l'herbicide le plus utilisé dans le monde. L'augmentation spectaculaire des ventes de cet herbicide est liée au développement de cultures résistantes au glyphosate (Knezevic S.Z., 2002).

- Etat de développement

Différentes études sont encore menées sur le maïs RR par différents acteurs (Monsanto, association de protection de l'environnement, gouvernement,..) afin d'évaluer les risques et les impacts sur l'environnement ainsi que les impacts sur l'ensemble du système de production et sur l'environnement. Ces études sont réalisées principalement aux Etats-Unis.

→ **Utilisation commerciale**

Aux Etats-Unis, le maïs transgénique est commercialisé depuis 1996. En cette époque, 3% de la surface du maïs était transgénique. En 2004, 18% des surfaces de maïs sont transgéniques (Benbrook C.M., 2004).

Dans l'Union Européenne, depuis 1999, six Etats membres rejoints en 2001 par la Belgique, avaient refusé toute agréation concernant la commercialisation de plantes transgéniques (moratoire). Ces pays souhaitaient une modification de la législation en vigueur, qu'ils reprochaient n'être pas assez stricte. Dans la nouvelle législation, les états attendaient un renforcement de l'évaluation du risque quant à la dissémination des cultures génétiquement modifiées et la mise en place d'un système de traçabilité et d'étiquetage des OGM. Cette nouvelle législation communautaire a été votée en 2001, c'est la directive 2001/18/CE relative à la dissémination volontaire d'OGM dans l'environnement. En 2004, ce moratoire a été levé, car deux nouvelles réglementations européennes relatives à l'étiquetage et à la traçabilité des OGM destinés à l'alimentation humaine et animale sont rentrées en vigueur en avril 2004.

---

<sup>18</sup> La résistance au glyphosate est obtenue de diverses façons selon les lignées. Dans la lignée GA 21<sup>18</sup>, la résistance est obtenue par insertion d'un gène codant pour l'enzyme modifiée par mutagenèse. Dans la lignée NK 603, la résistance est obtenue par l'utilisation du gène codant pour la protéine CP4 EPSPS d'origine bactérienne (*Agrobacterium tumefaciens*). Le caractère de résistance est porté par un simple gène dominant.

Le 20 juillet 2004, Monsanto a reçu l'approbation de l'Union Européenne quant à la mise sur le marché d'un maïs génétiquement modifié résistant au glyphosate (*Zea mays* L. lignée NK 603). Par cette autorisation, ce maïs « peut être utilisé comme n'importe quel autre maïs, à l'exception de la culture et des utilisations en tant que denrées alimentaires ou ingrédients de denrées alimentaires ». Cette autorisation est valable pour une durée de 10 ans.

→ Application au champ

Depuis 1995 et avant que la Belgique ne se joigne au moratoire européen, 41 essais en champs pour des plantes génétiquement modifiées ont été menés. En 1998, 1999 et 2000, des expériences en champ pour du maïs RR de Monsanto ont été effectuées en Belgique (Belgian Biosafety Server, 2004). Depuis 2003, aucune expérience n'a plus été menée en Belgique.

## **b. L'amélioration variétale classique**

On distingue deux types de cultivars obtenus par amélioration classique. Ceux tolérants aux mauvaises herbes et d'autres qui les éliminent activement par une action allélopathique, effet d'une plante sur une autre par libération de substances chimiques. L'allélopathie sera décrite plus en détails à la page suivante.

- ***Cultivars tolérants aux mauvaises herbes***

- Principe agronomique

Les caractères qui rendent un cultivar plus compétitif envers les mauvaises herbes ont trait au développement racinaire, à la vigueur juvénile, à la taille des feuilles et au caractère allélopathique (Bond W. and Grundy A.C., 2001). Les variétés plus couvrantes ou les variétés qui démarrent plus vite sont plus compétitives que les autres variétés.

- Etat de développement

Ces caractères génétiques ne sont pas encore à l'heure actuelle dans les variétés commercialisables. Des recherches sont encore nécessaires.

- ***Sélection de variétés à activité allélopathique***

- Principe agronomique

De nombreuses plantes ont une activité allélopathique, elles sécrètent des substances phytotoxiques appelées allélochimiques. Parmi celles-ci, le maïs libère les mêmes allélochimiques que le seigle ou le blé, ce sont les acides hydroxamiques. Les deux principaux types de molécules sont la DIBOA (2,4-dihydroxy-1,4-benzoxazin-3-one) et la DIMBOA (2,4-dihydroxy-7-méthoxy-1,4-benzoxazin-3-one). Elles seraient produites par une voie parallèle à celle du tryptophane (Chiapusio G. et al., 2002).

L'activité allélopathique des plantes est un caractère qui s'est progressivement atténué lors du processus de sélection continue des cultures pour d'autres caractéristiques agronomiques telles que le rendement ou le taux de croissance (Wu H. et al., 1999). Etant donné que l'activité allélopathique d'une plante est contrôlée génétiquement (Wu H. et al., 1999), il devrait être possible de réintroduire cette capacité par croisements.

- Etat de développement

Beaucoup de recherches doivent encore être menées dans l'amélioration du caractère génétique lié à l'allélopathie du maïs. Plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que ce caractère était un caractère polygénique faiblement corrélé avec les gènes d'intérêt agricole (Chiapusio G. et al., 2002; Wu H. et al., 1999) montrant ainsi les difficultés auxquelles auront à faire face les sélectionneurs.

### **c. Agro-écologie**

- **Allélopathie**

- Principe agronomique

L'allélopathie a été définie selon (Rice E.L., 1984) comme « l'effet d'une plante (incluant un microorganisme) sur une autre plante grâce à la production et la libération d'un (ou plusieurs) composé(s) chimique(s) dans l'environnement ». Cette définition inclut aussi bien les effets stimulants ou inhibiteurs, en fonction de la concentration du (des) composé(s). Jusqu'à présent, la plupart des effets allélopathiques identifiés sont des effets inhibiteurs (Wu H. et al., 1999).

Les produits qui causent ces effets sont des substances phytotoxiques appelées allélochimiques. On considère généralement que ces substances sont des métabolites<sup>19</sup> secondaires de voies métaboliques principales. Il ne semble pas qu'ils exercent un rôle dans le métabolisme primaire, essentiel à la survie de la plante (Cobb A.H. and Kirkswood R.C., 2002).

La nature des allélochimiques est très diverse mais elle peut être classée en trois catégories : les composés phénoliques, les terpènes et les alcaloïdes. L'activité allélopathique peut aussi être provoquée par plusieurs allélochimiques chez certaines espèces. Différentes voies de libération de ces substances existent, dont la plus importante est l'exsudation racinaire.

- Etat de développement

L'état de développement sera présenté ci-dessous.

- **Application de l'allélopathie : Intercropping**

- Principe agronomique

L'«intercropping» a été défini dans les stratégies (cfr. 2.2.1.b). Cette méthode peut être considérée comme une innovation si on choisit des cultures de couverture à activité allélopathique, ce qui renforcera l'action contre les adventices.

- Etat de développement

De nombreuses expériences ont été menées sur la capacité de ces systèmes à éliminer les mauvaises herbes. Des résultats variables ont été répertoriés, même dans les cas de combinaisons identiques de cultures (Hatcher P.E. and Melander B., 2003). Les publications à ce sujet semblent avoir augmenté depuis 1998.

---

<sup>19</sup> Les métabolites sont les intermédiaires et les produits du métabolisme. Le terme métabolite est habituellement restreint aux petites molécules (Wikipedia, 2005).

- **Application de l'allélopathie : Résidus de cultures ou mulch**

- Principe agronomique

Les résidus de culture permettent un contrôle des mauvaises herbes par leur présence physique sur le sol, mais aussi grâce à la libération de substances allélochimiques (Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003). En 1983, Barnes and Putnam rapportaient que les résidus de seigle utilisés comme mulch réduisait la biomasse d'adventices de 63%.

- Etat de développement

En Caroline du Nord, aux Etats-Unis, les propriétés allélopathiques des résidus de culture du seigle dans un système de non-labour ont été étudiées. Les résultats ont montré qu'un contrôle efficace (80 à 95%) de certaines adventices<sup>20</sup> en début de saison pouvait être obtenu de cette manière (Nagabhushana G.G. et al., 2001). Une autre étude a montré que les résidus de seigle en culture de maïs conféraient un avantage pour le contrôle d'une adventice (*Ipomoea lacunosa* L.) en début de saison, mais les trois autres adventices évaluées n'étaient pas détruites par la culture de couverture (Norsworthy J.K. and Frederick J.R., 2005).

- **Application de l'allélopathie : herbicides naturels et les herbicides dérivés**

- Principe agronomique

Les **herbicides naturels** sont des substances allélochimiques produites naturellement par des organismes vivants, des plantes supérieures et des micro-organismes et qui ont une propriété herbicide. Ils peuvent être utilisés directement pour le contrôle des adventices sur le même modèle que celui des herbicides.

Les **herbicides dérivés** sont produits synthétiquement à partir de la structure de ces produits naturels. En effet, les herbicides naturels peuvent servir de modèle à la découverte de nouvelles molécules et dans ce cas, leur efficacité peut être améliorée par des changements structuraux. De plus, la modification de ces produits naturels peut être une piste de fabrication d'herbicides plus sélectifs (Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003).

- Etat de développement

La recherche d'herbicides à partir de produits naturels n'ayant jamais été réellement développée avant ces dernières années, il existe un réel **potentiel de découverte de nouvelles molécules herbicides** parmi ces produits car la structure chimique des molécules organiques diffère des molécules synthétiques existantes et qu'elle est extrêmement diversifiée (Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003; Duke, 2005).

- **Densité de culture**

- Principe agronomique

Les plantes sont plus compétitives par rapport aux adventices en modifiant le schéma de culture (Weiner J. et al., 2001) comme augmenter le semis de la culture ou de diminuer la largeur de l'interligne.

---

<sup>20</sup> Cassia obtusifolia L., Ipomoea spp., Xanthium sumarium L., Sida spinosa L., Portulaca leracea L., Amaranthus spp.

- Etats de développement

Bien que la plupart des études montrent une diminution de la biomasse des adventices à densités de cultures plus élevées, il n'est pas toujours vérifié que l'augmentation de la densité de la culture conduira systématiquement à une réduction de la biomasse des adventices (Weiner J. et al., 2001). Dans la plupart des expériences portant sur la densité de culture, la densité est modifiée seulement dans une dimension : en augmentant le nombre de plants dans le rang.

Or, des arguments théoriques et des modèles de répartitions spatiales de la compétition des plantes suggèrent que la capacité de la culture à supprimer les adventices à des densités plus élevées peut être limitée par la distribution spatiale des plantes dans le champ. Accroître la densité de culture à l'intérieur des rangs provoque l'augmentation de la compétition à l'intérieur de la culture elle-même (compétition intraspécifique) plus qu'une augmentation de la compétition entre la culture et les adventices. Par contre, si la densité de culture est augmentée plus uniformément suivant les deux dimensions, la suppression des adventices par l'avantage donné à la culture serait amélioré (Weiner J. et al., 2001).

Comme c'est le cas pour les cultures de couverture, des recherches sont encore nécessaires pour vérifier ces hypothèses et mettre en évidence les facteurs responsables des variations des résultats observés dans les différentes études.

- **Lutte biologique**

- Principe agronomique

Le contrôle biologique utilise les interactions spécifiques entre organismes pathogènes ou adventices de culture et leurs antagonistes. De manière plus large, ce terme fait maintenant aussi référence à l'utilisation de produits naturels.

Le contrôle biologique des adventices peut être obtenu par l'utilisation de pathogènes de plantes. La principale limite du contrôle biologique réside dans le fait qu'elle utilise des relations spécifiques entre organismes et qu'elle est donc difficilement applicable à l'ensemble des adventices.

- Etat de développement

La recherche progresse sur l'utilisation d'insectes se nourrissant des adventices ou de graines d'adventices (Messermith C.G. and Adkins S.W., 1995), ou de champignons et bactéries parasites des graines, des parties aériennes ou racinaires des adventices. De nombreuses recherches sont encore nécessaires afin de connaître les relations spécifiques entre les adventices de cultures et leurs prédateurs, la manière de maintenir les populations présentes dans le champ au cours du temps, et l'influence des autres techniques de désherbage sur ces populations.

- **Limiter l'introduction et la dispersion des adventices**

- Principe agronomique

Il existe d'autres sources d'infestation de mauvaises herbes que la seule banque de graines présente dans la parcelle et le renouvellement de celle-ci par leur germination et leur floraison. L'utilisation d'engrais et de mulchs organiques peut être à l'origine d'introductions de nouvelles graines (Bond W. and Grundy A.C., 2001). Cependant, ce problème peut être réglé en compostant le fumier par exemple. La température atteinte pendant la phase de compost est en général suffisamment élevée pour tuer la plupart des semences d'adventices (Barberi P., 2002).

- Etat de développement

L'état de développement des méthodes pour limiter l'introduction et la dispersion des adventices n'a pas été traité faute de données.

- **Désherbage thermique :**

- Principes agronomiques

Le désherbage thermique consiste à chauffer la partie aérienne des plantes pour les détruire. Tant qu'elle est jeune, l'adventice est définitivement détruite. Par cette méthode, on peut détruire pratiquement toutes les mauvaises herbes germant avant la levée de la culture. Mais, les mauvaises herbes levant après la culture ne sont pas affectées.

- Etat de développement

L'état de développement du désherbage thermique n'a pas été traité faute de données.

#### **d. Paillage plastique**

- Principes agronomiques

Le plastique noir<sup>21</sup> peut être utilisé comme moyen de lutte contre les adventices avec des propriétés similaires aux mulching. En effet, celui-ci favorise le réchauffement du sol et aide le maïs à germer plus tôt ce qui le rend le maïs plus compétitif. De plus, le plastique noir évite également l'apparition de mauvaises herbes.

- Etat de développement

L'état de développement du paillage plastique n'a pas été traité faute de données.

#### **e. Innovation institutionnelle**

Une innovation institutionnelle n'est pas une innovation technique, mais elle favorise le développement de celle-ci.

Les mesures agri-environnementales peuvent être considérées comme une innovation institutionnelle. Les subsides pour des méthodes limitant l'utilisation des herbicides favoriseront celles-ci et leur recherche.

#### **f. Etats de développement des différentes approches dans la littérature**

Les articles sur l'allélopathie sont assez fréquents, par rapport aux publications sur la densité de semis, herbicides naturels ou culture de couverture. Les publications à ce sujet semble avoir augmenté depuis 1998. Toutefois, on les rencontre légèrement moins que les articles sur les plantes génétiquement modifiées, résistantes aux herbicides. Les publications sur la densité de semis sont moins fréquents et semble ne pas avoir évolué entre 1995 à 2004.

---

<sup>21</sup> Le plastique noir est très utilisé pour la culture des fraises.

### 2.3.2. Synthèse des principes agronomiques des innovations

Tableau 8 : Principes agronomiques des innovations

Innovations		Principes agronomiques
Génie génétique		Insertion d'un gène de résistance à l'herbicide provenant d'une autre espèce.
Amélioration variétale classique		Cultivars tolérants aux mauvaises herbes.
➤ Sélection de cultivars à activité allélopathique		Amélioration du caractère allélopathique des variétés commercialisées, par sélection classique
Agro-écologique	➤ Allélopathie	Effet d'une plante sur une autre plante grâce à la production et la libération d'une substance chimique
	○ Culture de couverture	Culture couvrant le sol pendant l'interculture
	○ Sous-semis	Culture couvrant le sol pendant la saison de culture, implantée après la culture principale
	○ Résidus de culture ou « mulching »	Culture détruite laissée sur le sol pendant la culture ou pendant l'interculture
	○ Herbicides naturels	Produits naturels présentant une activité herbicide
	○ Herbicides dérivés	Herbicides synthétisés à partir de la structure de produits naturels présentant une activité herbicide
	Densité de semis et largeur de l'interligne	Modifier la densité de semis ou la largeur de l'interligne pour favoriser la culture contre la compétition des adventices
	Contrôle biologique	Utilisation des relations adventices/pathogènes d'adventices pour améliorer la lutte contre les adventices de manière spécifique. Utilisation de cette technique dans un système de gestion intégrée des adventices.
	Limiter l'introduction des adventices	Eviter l'utilisation d'engrais et de mulchs organiques qui peut être à l'origine d'introductions de nouvelles graines en compostant le fumier
Désherbage thermique		Brûler les adventices
Paillage plastique		Plastique recouvrant les interlignes
Innovations institutionnelles		MAE, subsides

## 2.4. Liens entre innovations et filière

### 2.4.1. Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovations

#### a. Génie génétique

Les obstacles techniques et de développement socio-économique seront traités plus en détails au point 2.4.2.a

#### b. Amélioration végétale classique :

##### • Facteurs techniques

Les allélochimiques qui sont libérées chez certaines variétés de maïs agissent sur de nombreuses espèces d'adventices. L'exsudation de ces produits est augmentée lors d'un stress abiotique (Wu H. et al., 1999). Ces allélochimiques présentent aussi une certaine sélectivité. En effet, une des principales

molécules produites (DIBOA) agit principalement contre les monocotylédones, alors que l'autre molécule (BOA, issue de la dégradation de la DIBOA) est efficace contre les dicotylédones. De plus, des effets toxiques à l'encontre d'autres organismes ont aussi été associés à ces molécules. Par exemple, cela confère un avantage au maïs face aux attaques d'*Erwinia* spp et *Agrobacterium tumefaciens* (Chiapusio G. et al., 2002).

Cependant, plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que ce caractère était un caractère polygénique faiblement corrélé avec les gènes d'intérêt agricole montrant ainsi les difficultés auxquelles auront à faire face les sélectionneurs (Chiapusio G. et al., 2002; Wu H. et al., 1999). De plus, le recours aux herbicides ne pourra être totalement supprimé, même dans le cas d'obtention de lignée à caractère allélopathie élevé (Wu H. et al., 1999).

- **Aspects socio-économiques**

La sélection favorise les caractéristiques agronomiques telles que le rendement ou le taux de croissance et non l'activité allélopathie. Cette caractéristique est peu prise en compte dans les sélections.

**c. Allélopathie**

- **Facteurs techniques**

L'allélopathie est une méthode alternative au contrôle des mauvaises herbes qui devrait être utilisée dans le cadre d'une **gestion intégrée des adventices**. Elle pourra permettre ainsi de réduire la dépendance pour les herbicides et d'étendre la vie commerciale des herbicides chimiques en ralentissant l'apparition d'espèces résistantes.

Selon Norsworthy J.K. (2004), les résidus de seigle peuvent remplacer les herbicides de pré-émergence en culture de maïs, permettant donc de diminuer le recours aux traitements chimiques, mais non de les supprimer totalement. Les systèmes d' « intercropping » ou des résidus de culture ne peuvent substituer les herbicides de post-émergence (Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003). Selon Wu H. et al. (1999), c'est la nature sélective de l'allélopathie qui ne permettra pas de se passer des herbicides chimiques.

- **Aspects socio-économiques**

Les acteurs interrogés restent assez sceptiques quant à l'application réelle de l'allélopathie dans la gestion des adventices. A l'heure actuelle, on fait moins de recherche sur l'allélopathie que sur le génie génétique.

#### **d. Intercropping :**

- **Facteurs techniques**

Les systèmes d' « intercropping » peuvent présenter l'avantage d'un meilleur contrôle des adventices de deux façons : si la culture intercalaire est plus compétitive que la culture seule pour capter les ressources utilisées par les adventices, ou si la culture intercalaire inhibe la croissance des adventices par allélopathie (Barberi P., 2002). En plus de son contrôle contre les adventices, la seconde culture est une assurance contre les pertes et permet de limiter l'érosion ou d'améliorer la fertilité du sol. En effet, différentes plantes ayant été répertoriées comme secrétant des substances allélochimiques: la moutarde noire, le sorgho hybride, le seigle, le blé, le sarrasin, le tournesol, la vesce, le trèfle violet,... et le maïs (Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003) sont également utilisées comme cultures pièges à nitrate ou de couverture, améliorant ainsi également la fertilité du sol et limitant l'érosion. Le rendement global des deux cultures est supérieur au rendement d'une seule culture même si le rendement d'une culture est réduit à cause de cette association (Hatcher P.E. and Melander B., 2003).

Cependant, la mise en place de telles pratiques peut amener de nouveaux problèmes. Il faut particulièrement veiller à ce que l'implantation d'une autre culture ne favorise pas l'augmentation des populations d'insectes, de champignons ou de bactéries pathogènes de la culture, favorisant ainsi la dispersion des maladies (Hatcher P.E. and Melander B., 2003). Ce sont des points que les acteurs interrogés ont soulignés.

- **Aspects socio-économiques**

L'aspect socio-économique n'a pas été traité faute de données.

#### **e. Herbicides naturels**

- **Facteurs techniques**

Le **potentiel de découverte de nouvelles molécules herbicides** à partir de produits naturels existe réellement, car la structure chimique des molécules organiques diffère des molécules synthétiques existantes et qu'elle est extrêmement diversifiée (Duke, 2005; Hatcher P.E. and Melander B., 2003).

Mais l'inconvénient pourrait résider dans la difficulté à synthétiser ces molécules (Kudsk and Streibig, 2003) ou dans le fait que ces produits possèdent généralement un temps de demi-vie<sup>22</sup> plus court, limitant ainsi l'efficacité du traitement dans le temps.

- **Aspects socio-économiques**

L'aspect socio-économique n'a pas été traité faute de données.

#### **f. Densité de semis :**

- **Facteurs techniques**

En 1995, Teasdale J.R. a montré que le contrôle des adventices pouvait être augmenté en semant le maïs dans des lignes de 38 cm d'intervalle et en doublant la population de la culture par deux. Dans ce cas, la dose d'herbicides était réduite à 25% pour le même niveau de contrôle que l'application des doses pleines pour le même interligne. Cette réduction de l'interligne permettait aussi la fermeture des interlignes une semaine plus tôt, ce qui permettait de raccourcir la période critique de sensibilité à la

---

<sup>22</sup> Temps de demi-vie : temps nécessaire pour que l'activité diminue de moitié

compétition. Cependant, le doublement de la population n'a pas permis d'augmenter le rendement en grains, il faut donc en tenir compte lors du calcul du coût.

Comme c'est le cas pour les cultures de couverture, des recherches sont encore nécessaires pour vérifier ces hypothèses et mettre en évidence les facteurs responsables des variations des résultats observés dans les différentes études.

- **Aspects socio-économiques**

L'aspect socio-économique n'a pas été traité faute de données.

#### **g. Lutte biologique**

- **Facteurs techniques**

La principale limite de la lutte biologique réside dans le fait qu'elle utilise des relations spécifiques entre organismes et qu'elle est donc difficilement applicable à l'ensemble des adventices. De plus, la mise en oeuvre de ces pratiques peut être rendue difficilement compatible avec d'autres méthodes. Par exemple, l'intensité du labour perturbe le sol et diminue les populations de champignons, de bactéries pathogènes du sol et d'adventices. L'effet sur les insectes est variable en fonction des espèces et du nombre de passages.

Etant donné la spécificité du contrôle biologique, son utilisation la plus intéressante réside dans le contrôle d'adventices difficilement éliminées par les systèmes conventionnels. C'est aussi une option quand les herbicides de synthèse sont prohibés comme dans les systèmes d'agriculture biologique.

Le contrôle biologique permettrait de contrôler spécifiquement certains problèmes difficilement résolus par d'autres méthodes (Hatcher P.E. and Melander B., 2003). A cette fin, de nombreuses recherches sont encore nécessaires afin de connaître les relations spécifiques entre les adventices de cultures et leurs prédateurs, la manière de maintenir les populations présentes dans le champ au cours du temps, et l'influence des autres techniques de désherbage sur ces populations.

- **Aspects socio-économiques**

L'aspect socio-économique n'a pas été traité faute de données.

#### **h. Paillage plastique :**

- **Facteurs techniques**

Le plastique noir favorise le réchauffement du sol et évite l'apparition de mauvaises herbes. Il peut être biodégradable.

Le plastique noir dans la technique du paillage a comme inconvénient de réchauffer vite et de provoquer des brûlures des feuilles et des fruits qui sont en contact avec lui. De même, son coût le rend prohibitif et son utilisation a un impact négatif sur l'environnement.

- **Aspects socio-économiques**

L'aspect socio-économique n'a pas été traité faute de données.

#### **i. Désherbage thermique**

- **Facteurs techniques**

Les facteurs techniques du désherbage thermique n'ont pas été traités faute de données.

- **Aspects socio-économiques**

La possibilité du désherbage thermique n'est pas abordée lors des conseils pour le désherbage en culture de maïs puisque la technique est coûteuse et les solutions mécaniques, plus accessibles, sont efficaces (UNAB, 2005).

**j. Synthèse des avantages et inconvénients ainsi que des facteurs de développement des innovations**

Tableau 9 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement du génie génétique, maïs RR. « +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech se rapporte à tous ce qu'est technique et à la technologie ; Agr=agriculteur ; P.pub= pouvoir public ; Cons= consommateurs, public.

	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-Economique				Envi	Santé	
			Agr	Firme	P.pub	Cons			
Génie génétique : maïs RR	Efficacité technique du maïs RR pour le désherbage	+							
	Simplicité (1 seul produit)	+							
	Gestion de la rotation difficile avec d'autres plantes RR	-							
	Sélectivité efficace du Roundup donc rendement plus élevé	+							
	Possibilité de non-labour :	+							
	⇒ Réduction de l'énergie fossile par rapport au labour		+		+		+		
	⇒ Diminution de la charge de travail par rapport au labour		+						
	⇒ Limite l'érosion par rapport au labour		+				+		
	⇒ Augmentation de la quantité d'herbicides par rapport au labour		-	+?	-?	-	-	-	
	Revenu des agriculteurs : Prix actuel du Roundup moindre, coûts des semences		?!					-	
	Séparation de la filière :								
	⇒ Co-existence des différents types d'agricultures : risque de contamination		-		-	?	?	?	
	⇒ Problème de traçabilité et de transparence : coût, charge de travail		-		-	?			
	Impact sur la compétitivité des agricultures nationales (ex : coût de la séparation,...)		?	?	?				
	Impact sur l'autonomie et la liberté des agriculteurs à choisir		-?						
	Impact sur la rentabilité et la structure socio-économique de la chaîne alimentaire				?				
	Impact sur les orientations de recherche :								
	⇒ Plus grand intérêt pour le génie génétique, donc plus d'argent et d'emplois			+	?				
	⇒ Moins d'intérêt pour les autres herbicides et donc moins d'argent et d'emplois			-?	?				
	⇒ Impacts sur la disponibilité des méthodes de lutttes actuelles pertes de leur connaissance		?	?					
	Impact sur l'emploi en agriculture, des firmes d'intrants (fongicides...), sur la chaîne alimentaire, recherche		?	?	?	?			
	Risque pour la biodiversité à cause du flux de gène (moindre car pas de plantes proches du maïs)						-?!?		
	Modification de la flore d'adventives						-?!?		
	Impact sur la diversité des cultures et des variétés						-?!?		
	Effets non-attendus sur l'environnement						-?!?		
	Risque d'avoir des adventives résistantes, tolérantes au Roundup, donc augmentation des quantités d'herbicides		-?!?	?	-?		-?!?	-?!?	
	Roundup moins polluant que d'autres herbicides				+?!?	+?!?	+?!?	+?!?	
	Mais aspects négatifs du Roundup sur l'environnement et la santé				-?!?	-?!?	-?!?	-?!?	
Possibilité de doses réduites		+?!?				+?!?	+?!?		
Santé : Risque d'accumulation du Roundup dans la plante et protéines toxiques ou allergéniques (probablement très faible)						-?!?	-?!?		
	Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapant			
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
	Importants investissements des firmes qui devront rentabiliser leurs activités		+						
	Opposition et craintes des consommateurs face OGM, protestation du bio							-	
	Cadre réglementaire contraignant								-

**Tableau 10 : Avantages/ inconvénients et facteurs de développement des cultivars à activité allélopathique**

Cultivars à activité allélopathique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Destruction d'adventices (pas total)	+						
Action sur de nombreuses espèces adventices	+							
Diminution de la quantité d'herbicide	+, ?					+, ?	+, ?	
Mais besoin d'encore utiliser les herbicides chimiques	-					-	-	
Sélectivité (certaines molécules agissent sur les monocotylédones et d'autres sur les dicotylédones)	+							
Effets toxiques à l'encontre d'autres organismes ( <i>Erwinia</i> ,...)	+							
Caractère polygénique (difficulté technique)	-							
Corrélation faible avec les gènes d'intérêt agricole	-							
Nécessité de recherches supplémentaires			-					
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques			+	+	+	+		
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
Caractère peu intéressant pour la sélection (sélection s'intéresse plus au rendement, ...)					-	-	-	
Peu d'investissement des firmes privées par rapport au génie génétique						-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public

**Tableau 11 : Avantages / inconvénients et facteurs socio-économiques de l'allélopathie**

Allélopathie	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Action sur les adventices	+						
Diminue la dépendance et le recours aux traitements chimiques	+							
Augment la vie commerciale des herbicides chimiques	+							
Respectueux de l'environnement						+		
Besoin d'encore utiliser les herbicides chimiques	-	-	?	-	-	-	-	
Risque de toxicité et de dégradabilité	-					- ?	- ?	
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques			+	+	+	+		
Nécessité de recherches supplémentaires				-				
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
Peu d'investissement des firmes privées par rapport au génie génétique						- , ?		
Scepticisme des acteurs							- , ?	

**Tableau 12 : Avantages/ inconvénients et facteurs de développement des cultures de couverture et des sous-semis**

Culture de couverture, Sous-semis	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Contrôle des adventices	+						
	Assurance contre les pertes de rendement	+	+					
	Limite l'érosion							
	Amélioration de la fertilité du sol	+						
	Rendement supérieur de deux cultures que d'une culture seule	+	+					
	Rendement d'une culture prise séparément est plus faible	-	-					
	Risque d'insectes et de maladies supplémentaires	-	-					
	Limite l'utilisation d'herbicides	?			?	?	?	
	Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques							
	Facteurs de développement							
	Pas de données							

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

**Tableau 13 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement des herbicides naturels et dérivés**

Herbicides naturels, dérivés	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé	
			Agr	Firme	P.pub	Cons			
	Potentiel de découverte de nouvelles molécules herbicides	+							
	Piste (possibilité) de fabrication d'herbicides plus sélectifs	+							
	Difficulté à synthétiser ces molécules	-		-					
	Temps de demi-vie plus court	-							
	Plus respectueux de l'environnement que les herbicides synthétiques					+?	+?		
	Nécessité de recherches supplémentaires								
	Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+			
	Facteurs de développement		Facteurs stimulants				Facteurs handicapants		
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
	Utiliser pour le contrôle des adventices de la même manière que les herbicides								
	Recherche d'herbicides à partir de produits naturels a commencé seulement depuis quelques années (selon nos données)								
	.... (pas complet)								

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

**Tableau 14 : Avantages / inconvénients et facteurs développement de la densité de semis et modification de la largeur de l'interligne**

Densité de semis et largeur de l'interligne	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Diminution de la proportion d'adventices	+, ?!						
	Réduction d'herbicides	+, ?!			+, ?!			
	Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+		
	Nécessité de recherches supplémentaires			-				
	Effets discutés	?!		?!				
Facteurs de développement								
Pas de données								

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

**Tableau 15 : Avantages/ inconvénients et facteurs de développement de la lutte biologique**

Lutte biologique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé		
			Agr	Firme	P. pub	Cons				
	Spécificité : contrôle des adventices difficilement détruites par les autres méthodes	+								
	Respectueux de l'environnement					+				
	Difficilement compatible avec d'autres méthodes comme le labour	-								
	Spectre d'action faible	-								
	Difficilement praticable à grande échelle	-								
	Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+				
	Nécessité de recherches supplémentaires			-						
Facteurs de développement			Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
			Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
	Difficultés des procédures d'autorisations des agents de contrôle biologique									-
	Intérêt plus faible des firmes privées pour les composés naturels difficilement brevetables						-	-		
	Méthode très peu utilisé et inhabituelle en agriculture							-		
	Développement de l'arboriculture bio			+						

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapants (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

**Tableau 16 : Avantages/ inconvénients et facteurs de développement du désherbage thermique**

Désherbage thermique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Efficace contre les adventices	+						
Prix très élevé			-					
Impact sur l'environnement (coûteux en énergie)					?	-		
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+			
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
D'autres solutions mécaniques, plus accessibles (moins coûteuse), sont efficaces					-	-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

**Tableau 17 : Avantages/ inconvénients et facteurs de développement socio-économique du paillage plastique**

Paillage plastique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique				Envi	Santé
			Agr	Firme	P.pub	Cons		
	Efficace contre les adventices	+						
Germination plus rapide du maïs	+						+	
Technique coûteuse			-					
Mains d'œuvre			-, ?		?		?	
Impact négatif sur l'environnement (plastique sauf plastique bio-dégradable)								
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+			
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
Pas abordé lors des conseils pour le désherbage en culture de maïs							-	
D'autres solutions mécaniques, plus accessibles (moins coûteuse), sont efficaces					-	-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur ; Firmre= toutes les firmes +recherche...; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public.

## **2.4.2. Avantages, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques**

L'utilisation du maïs résistant au Roundup présente certes des avantages mais aussi différents problèmes. Ces avantages et inconvénients sont d'ordre agronomique, environnemental et économique.

### **a. Aspects agronomiques**

#### **• Avantages du maïs RR**

- Désherbage : simplicité, flexibilité

Le système du maïs RR est simple car utilisant qu'un herbicide le Roundup, il ne demande pas de jongler avec plusieurs produits et d'identifier les adventices qui nécessitent des traitements plus adaptés, comme c'est le cas actuellement avec les traitements chimiques conventionnels. Le Roundup agit sur un large spectre d'adventices. La simplicité et l'efficacité du maïs RR dans la gestion des adventices sont des avantages importants.

- Non-labour

Une autre conséquence de l'adaptation de maïs RR est l'augmentation des pratiques de non-labour. Le non-labour présente certains avantages, dont le plus important est l'économie de travail grâce à la réduction des passages, ce qui se traduit par une économie de temps, de mains d'œuvre et de fuel. Les avantages agronomiques concernent l'augmentation de la matière organique, la réduction de l'érosion,...

- Possibilité de réduction de doses

La possibilité de réduire la quantité d'herbicides utilisée est également un critère qui oriente le choix du producteur. Selon Sankula and Blumenthal, le maïs RR permet la diminution des doses en facilitant l'utilisation de doses réduites d'herbicides (Sankula S. and Blumenthal E., 2004). Mais ceci est controversé.

- Valeur nutritive du maïs RR

Une des utilisations principales du maïs étant de servir de fourrage à des animaux d'élevage, des comparaisons sur la teneur en éléments nutritifs entre le maïs RR et conventionnel ont été réalisées concernant la teneur en protéines, glucides, lipides, fibres, acides aminés, acides gras, vitamines, minéraux, métabolites secondaires,... (Hammond B. et al., 2004; Sidhu R.S. et al., 2000). Ces expériences montrent que «le maïs RR est comparable en composition aux maïs hybrides conventionnels<sup>23</sup>» (Hammond B. et al., 2004).

D'autres comparaisons sur les **performances de production d'élevages** (Chesson A. and Flachowsky G., 2003; Hammond B. et al., 2004; Hyun Y. et al., 2004) concluent qu'il n'y a pas de différences notables.

---

<sup>23</sup> L'insertion et l'expression de la séquence codante CP4 EPSPS n'altère pas la proportion d'acides aminés aromatiques associés à la voie de l'acide shikimic<sup>23</sup> Acide shikimic est un métabolite secondaire des végétaux. Il est produit en réponse en application du glyphosate. Il peut entrer dans la biosynthèse de la phénylalanine et la tyrosine  
[http://toildepices.free.fr/chimie/synthese/aa\\_bio.html](http://toildepices.free.fr/chimie/synthese/aa_bio.html)

- **Inconvénients du maïs RR**

- Augmentation de la quantité d'herbicides

La capacité du maïs RR à diminuer les quantités d'herbicides appliquées est fortement remise en question par Benbrook (2004). Son étude s'appuie sur les chiffres répertoriés par le NASS – USDA et vient contredire les arguments des partisans des biotechnologies qui « ont maintes fois affirmé que les cultures conçues génétiquement ont réduit l'utilisation de pesticides » (Benbrook C.M., 2004). On observe que cette technologie permettait en 1996 une économie de 0,9 kg de matière active appliquée sur la culture par rapport aux surfaces de maïs conventionnel. Par contre, en 2004, la quantité totale d'herbicides appliquées sur les surfaces herbicides résistantes est supérieure de 0,45 kg à celle sur les surfaces conventionnelles. Le changement entre les quantités d'herbicides appliquées sur les surfaces conventionnelles et herbicides résistantes entre 1996 et 2004 (- 0,9 kg/ha à + 0,45 kg/ha) est causé, selon Benbrook, par une augmentation de l'utilisation d'herbicides sur les surfaces de maïs résistant aux herbicides et les réductions de quantité d'herbicides appliqués sur les surfaces conventionnelles de maïs.

De plus, la technique du non-labour qui peut être utilisée en association avec le maïs RR exige une forte dépendance en herbicides. La **non-rémanence du glyphosate** impliquera de devoir réaliser plusieurs passages (au minimum deux) pour le traitement des adventices. En fonction des doses recommandées, cette nécessité de réaliser plusieurs traitements permettrait-elle réellement de diminuer les quantités d'herbicides ? Cela peut donc remettre en doute la réelle simplicité du système.

- Apparition d'adventices résistantes au Roundup

Les risques d'apparition de **résistances** sont inévitables à moyen ou long terme et sont une conséquence de l'utilisation continue du même mode d'action. Le principe d'utilisation du maïs résistant au Roundup implique de ne dépendre pratiquement que d'un mode d'action, même si d'autres produits peuvent être utilisés. Avec l'emploi du maïs RR qui engendra l'augmentation de l'utilisation du glyphosate, la pression de sélection sera accrue sur les adventices et conduira à l'apparition de résistances.

- Modification de la flore adventice :

Le glyphosate (Roundup), malgré son large spectre d'action, ne permet pas de contrôler toutes les adventices (Knezevic S.Z., 2002). L'utilisation continue du glyphosate entraînera à moyen terme un changement du spectre d'adventices vers des espèces plus tolérantes à l'herbicide (Shaner D.L., 2000). Ces changements de la flore adventice vers des adventices plus tolérantes conduira à l'augmentation des herbicides utilisés et donc des coûts pour le contrôle des mauvaises herbes (Knezevic S.Z., 2002).

- Conditions météorologiques

Les **conditions météorologiques** lors du traitement influencent l'efficacité de l'herbicide au moment de la pulvérisation. En effet, le Roundup a besoin d'un minimum de chaleur pour être efficace.

- Gestion de la rotation

Dans le cas où plusieurs cultures RR seraient disponibles, la gestion de la rotation pourra devenir beaucoup plus compliquée, car il faudra penser sur quelles parcelles avaient été implantées ces différentes cultures. Il faudra éviter leur succession dans une rotation. En effet, certaines repousses de cultures sont fréquentes ou connues pour être difficilement éliminées.

## **b. Aspects sanitaires et environnementaux**

### **• Effets toxicologique du Roundup**

En ce qui concerne la toxicité du Roundup, sa matière active, le glyphosate est reconnu en Belgique comme un produit à moindre toxicité pour l'environnement. En effet, un certain nombre d'organisations internationales, dont par exemple l'Organisation Mondiale de la Santé, considèrent ce produit comme non toxique aux normes légales.

Toutefois, de plus en plus d'études viennent montrer le contraire ou du moins prouver qu'il est loin d'être sans effets pour l'homme, la vie sauvage et l'environnement. Parmi les organisations qui appuient ce point de vue, le réseau d'associations *Pesticide Action Network* (PAN) présente un certain nombre de faits qui tendent à prouver la toxicité du produit et à démentir cette publicité (Morin H. 2005).

#### ○ Formulation du produit

La formulation du Roundup inclut généralement des surfactants. La présence de ces surfactants est nécessaire pour améliorer la pénétration du glyphosate dans la plante. Or, ces surfactants ont des effets toxiques pour l'utilisateur et l'environnement (Deschomets G (Monsanto), 2001). Les effets toxiques de produits contenant des surfactants de type POEAs<sup>24</sup> en combinaison avec du glyphosate sont plus sévères qu'avec du glyphosate seul. De même, les effets toxiques du produit sur les organismes aquatiques seraient causés majoritairement par ces surfactants. D'après un article récent du PAN Belgique, la DL50<sup>25</sup> du Roundup est trois fois plus faible que celle du glyphosate seul (PAN Belgique Pesticide Action Network Belgium, 2005).

#### ○ Toxicité sur l'homme

En ce qui concerne les effets sur la santé humaine du Roundup, il semblerait que la toxicité aiguë ait été sous-estimée. En effet, des cas d'eczéma, d'irritations oculaires, ou autres ont été rapportés remettant en question certaines études sur la sécurité du Roundup. Des effets cancérogènes, mutagènes et sur la reproduction<sup>26</sup> peuvent être engendrés (Morin H., 2005).

Tandis que d'autres études concluent que l'utilisation de Roundup n'engendre pas d'impacts négatifs sur le développement, la reproduction ou le système endocrinien de l'homme et d'autres mammifères. Ces études indiquent que sous des conditions standards, le Roundup n'est pas un risque pour la santé humaine (Williams et al., 2000).

#### ○ Dégradation du produit : l'AMPA

La dégradation du glyphosate produit deux métabolites : le glyoxylate et l'acide amino méthyl phosphonique (Amino Méthyl Phosphonic Acid, AMPA). Pour l'AMPA, cette molécule est également susceptible d'avoir des effets nocifs sur l'environnement et les organismes vivants (PAN Belgique Pesticide Action Network Belgium, 2005).

En effet, en France, 40% des échantillons contrôlés contiennent de l'AMPA à des teneurs supérieures aux normes européennes (Web-Agri, 2005).

---

<sup>24</sup> POEAs : les surfactants tallowamines polyéthoxylées

<sup>25</sup> La dose létale 50 ou DL50 est la dose qui tue 50% d'une population (de rats) suite à son ingestion.

<sup>26</sup> Le Roundup inhiberait la production d'hormones stéroïdes qui pourrait conduire à une perte de fertilité chez les hommes (Walsh L.P. et al., 2000). Seralini annonce des effets similaires du Roundup sur la reproduction, en affectant des hormones intervenant sur la synthèse des oestrogènes (Morin H., 2005). Il ajoute que le produit formulé accroît les effets toxicologiques par rapport au produit seul, et qu'il faudra donc probablement revoir la croyance générale selon laquelle le produit en formulation diluée les effets de la matière active.

- Toxicité sur les organismes vivants

La dérive du glyphosate vers des organismes non-cibles est intrinsèque à l'utilisation de produits phytosanitaires.

Enfin, au niveau environnemental, des groupes d'animaux peuvent être touchés par le glyphosate, et encore plus par le Roundup : insectes, invertébrés, poissons, batraciens, oiseaux. On soupçonne aussi que le Roundup affecte les associations symbiotiques entre les cultures RR et les bactéries fixatrices d'azote, et leur capacité à résister à certaines attaques de pathogènes par rapport aux variétés conventionnelles (PAN Belgium Pesticide Action Network Belgium, 2005).

En conclusion, même si le Roundup est moins toxique que d'autres produits, il présente malgré tout des impacts négatifs. De plus, de grandes incertitudes persistent sur le niveau réel de toxicité du glyphosate, de ses métabolites et des surfactants. Toutefois, il faut garder à l'esprit que même si le Roundup semble avoir des inconvénients environnementaux, il faut comparer ces inconvénients à ceux apportés par d'autres produits.

- **Effets toxicologique du maïs RR traité au Roundup**

- Faible risque sur la Sécurité alimentaire : protéines toxiques ou allergéniques

L'insertion du nouveau gène ne peut produire d'effet toxique ou allergène. On anticipe que l'effet toxique ou allergène du maïs transgénique par rapport aux variétés conventionnelles devrait être nul ou faible. En effet, la protéine EPSPS présente dans le maïs RR, ne montre aucune ressemblance à des toxines ou d'autres protéines allergènes contenues dans les bases de données PIR, EMBL, SwissProt et GenBank<sup>27</sup> (Monsanto Company, 2002). La dégradation rapide de la protéine, qui limite donc le temps d'exposition dans le tractus gastro-intestinal et l'activation de processus immunitaires, laisse à penser que la protéine ne développera pas de propriétés allergéniques suite à sa non-dégradation.

- Risque d'accumulation du glyphosate dans la plante

En ce qui concerne l'emploi du maïs RR dans l'alimentation animale et étant donné le mécanisme permettant la résistance du maïs au glyphosate, l'**accumulation** de la molécule dans la plante fait craindre qu'il y ait un effet toxique sur le bétail. En effet, le maïs RR mobilise 15% de glyphosate de plus que les lignées parentes non génétiquement modifiées. De plus, 25 à 40% de la quantité appliquée est accumulée principalement dans les jeunes tissus, les méristèmes et à plus faible dose dans les racines. Cependant, le taux de glyphosate par unité de poids de matière sèche dans les tissus diminue après la période de traitement, probablement suite à la croissance de la plante qui a un effet de « dilution » sur la quantité de glyphosate accumulé (Hetherington et al., 1999).

- **Impact du Roundup sur le sol**

Le glyphosate est reconnu pour être rapidement dégradé et fortement adsorbé par les particules du sol. Or, la dégradation du glyphosate dans le sol et le temps de persistance peuvent être fonction des conditions climatiques et de la nature du sol. La persistance de la molécule varierait de trois jours dans certains sols du Texas, à un à trois ans dans des sites forestiers en Suède (PAN UK Pesticide Action Network United Kingdom, 2005).

- **Impact du Roundup sur les eaux**

D'après Gustafson (2002), l'utilisation du maïs résistant aux herbicides totaux tels le glyphosate et glufosinate permet de diminuer la contamination des eaux. Les propriétés différentes entre les

---

<sup>27</sup> Ces bases de données répertorient des séquences connues de protéines toxiques ou allergènes.

herbicides standard (ex. atrazine) et le glyphosate<sup>28</sup> est à la base de cette hypothèse. Si l'utilisation du glyphosate connaît une augmentation importante, cette molécule pourrait toutefois se retrouver dans les eaux. Pour rappel, le 10 mars 2004 la Commission Européenne, a interdit l'utilisation de l'atrazine, suite à l'inquiétude provoquée par la fréquence et l'importance de la contamination des eaux par l'atrazine. En effet, l'utilisation massive de l'atrazine depuis quatre décennies et ses propriétés physico-chimiques (grande solubilité et faible adsorption sur les particules du sol) ont entraîné la contamination des eaux. De plus, les experts n'ont pas pu conclure que l'atrazine ne présentait pas de risques pour les eaux.

- **Dissémination des gènes dans l'environnement**

Les inquiétudes relatives aux « aspects techniques » sont généralement communes aux plantes transgéniques en général. Ces aspects techniques ont trait à l'insertion du gène et aux effets pléiotropiques qui pourrait apparaître suite à l'insertion du gène.

Toutefois, il n'y a pas de risques liés à la dissémination des gènes vers d'autres espèces sauvages. En effet, en Belgique, il n'y a pas d'espèces sauvages proche du maïs comme le téosinte. Mais, un risque existe de contamination par le flux de gènes des cultures de maïs non transgéniques, posant en conséquence la question de la coexistence.

- c. **Aspects socio-économiques**

- **Séparation des filières et coexistence des cultures**

Le flux de gènes vers les cultures non transgéniques et particulièrement, vers les cultures bio, pourrait poser problèmes aux agriculteurs bio. La législation sur l'agriculture bio en Europe interdit le recours aux cultures transgéniques. La contamination des cultures bios par du pollen de cultures transgéniques peut cependant se produire dans le cas où les cultures sont relativement proches. Pour certains, le fait que la législation européenne tolère un taux de contamination dans les semences et les aliments revient à reconnaître que la contamination de la chaîne alimentaire est inévitable. De plus, la législation n'est pas claire sur les responsabilités en cas de contamination (Janssens L., 2003). En pratique, ce danger pourrait être diminué, mais non supprimé, par le respect d'une distance minimale entre les cultures génétiquement modifiées et conventionnelles. Certains agriculteurs conventionnels s'inquiètent également des contaminations éventuelles de leur culture par du pollen transgénique.

De plus, le maïs étant destiné en Belgique à l'alimentation animale, pourrait-on dès lors imaginer la séparation de sous-filières avec ou sans OGM au sein des filières viande et lait ? Le coût et les moyens nécessaires à cette fin semblent d'avance démesurés. Actuellement, la législation en vigueur sur la traçabilité des produits issus d'OGM (règlement CE 1830/ 2003) ne mentionne pas que les produits pour les animaux doivent être étiquetés « contenant des OGM ».

- **Coût de la technologie et revenu agricole**

En ce qui concerne les coûts de la technologie, les acteurs qui abordent ce sujet pensent que **les coûts pour le désherbage seraient diminués**. En général, ils argumentent cette affirmation en considérant les prix avantageux du Roundup actuellement. Il faudrait évidemment évaluer ce coût en le comparant au supplément à payer pour acquérir les semences.

Etant donné que le maïs RR n'est pas encore disponible sur le marché, il est difficile d'évaluer à présent le prix de la technologie. Cependant, lorsque celle-ci sera disponible, il est évident que pour qu'elle soit adoptée, elle devra présenter un avantage économique, surtout si l'on considère le contexte

---

<sup>28</sup> le glyphosate est appliqué à faibles doses et se lie fortement au sol.

actuel difficile auquel est confronté la technologie OGM. En considérant que les prix actuels d'un désherbage sans atrazine varient entre 70 et 100€ /ha<sup>29</sup>, il apparaît que le coût du désherbage et du supplément pour l'achat des semences devrait atteindre des prix comparables pour que le système RR et le glyphosate soient compétitifs.

- **Impact sur la filière**

Quant à l'impact que pourrait avoir l'utilisation du maïs RR sur la filière et le « marché » du maïs, très peu d'acteurs ont une idée à ce sujet. Beaucoup soulignent que l'utilisation de ce système, par la simplicité de son utilisation, pourrait provoquer la **perte de la technicité** que l'on a acquise jusqu'à présent pour mener à bien le désherbage du maïs.

En effet, dans notre pays, la connaissance des produits pour le désherbage du maïs n'est pas réellement l'apanage des agriculteurs mais plutôt des négociants en produits phytopharmaceutiques et des conseillers qui travaillent au sein d'ASBL telle que le CIPF. Utiliser un « kit » semences + Roundup fourni par Monsanto pourrait-il conduire à « faire sauter » le maillon que constituent les négociants en phytos au sein de la filière ?

- **Impact sur le secteur phytopharmaceutique**

Enfin, en ce qui concerne l'impact sur le marché des herbicides, le sentiment d'avoir trouvé le moyen pour lutter contre les adventices et la croissance des parts de marché pour le Roundup pourrait conduire les sociétés phytopharmaceutiques à ne plus continuer la **production d'anciens herbicides**. D'après Benbrook C.M. (2004), le succès de la technologie RR a **provoqué la chute des prix des herbicides**. En effet, Monsanto a augmenté ses parts de marché suite à l'adoption croissante des cultures RR, au détriment des autres sociétés phytopharmaceutiques. Ensuite, l'expiration du brevet de Monsanto pour le glyphosate a ensuite entraîné les réductions progressives du prix des produits en contenant. Ces deux facteurs sont, parmi d'autres, la cause de l'augmentation des quantités d'herbicides appliquées. Ces réductions de prix ont également provoqué une **réduction d'investissement pour la recherche de nouveaux herbicides**. Or, le nombre de molécules herbicides commercialisées est en diminution depuis une dizaine d'années (Kudsk and Streibig, 2003).

- **Aspects législatifs**

Avec la législation en vigueur<sup>30</sup> en Europe, la culture du maïs RR peut être envisagée en Belgique, sous réserve d'autorisation. A ce jour et à notre connaissance, il n'y a pas encore eu d'autorisation.

- **Opinion publique**

Le maïs RR pour s'installer devra faire face à l'opinion publique qui voit d'un mauvais oeil l'utilisation des plantes transgéniques par les incertitudes et les risques qui les entourent. De plus, les produits phytopharmaceutiques ayant ou étant soupçonnés d'impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine sont également rejetés par la société.

---

<sup>29</sup> Coûts obtenus à partir des essais du CIPF

<sup>30</sup> Législation en vigueur : voir site du service public fédéral-santé public, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement section environnement, ressources du vivant, OGM, législation  
[https://portal.health.fgov.be/portal/page?\\_pageid=56,512546&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL&\\_menu=menu\\_3](https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512546&_dad=portal&_schema=PORTAL&_menu=menu_3)

### 3. Evaluation systémique de la pertinence d'une betterave résistante à la rhizomanie<sup>31</sup>

---

**Résumé** - La rhizomanie est une maladie qui engendre des proliférations des radicelles au détriment de la racine principale. Le responsable de la rhizomanie est le virus des nervures jaunes et nécrotiques de la betterave, BNYVV (*Beet Necrotic Yellow Vein Virus*). Sa transmission est assurée par un protozoaire du sol, *Polymyxa betae* Keskin. Il s'agit d'une maladie d'importance économique aussi bien pour les betteraviers que pour l'industrie sucrière par la diminution du rendement brut et du taux de sucre des betteraves contaminées. Par ailleurs, en raison d'une prolifération importante des radicelles latérales, la quantité de terre véhiculée par le chevelu racinaire augmente les coûts de nettoyage. La rhizomanie est aujourd'hui présente dans toutes les régions de culture intensive de la betterave à travers le monde : Europe, Amérique du Nord et Asie.

Face au manque d'efficacité des adaptations culturales, vu le coût prohibitif de la lutte chimique (fumigation) et le caractère inutilisable à grande échelle de la lutte biologique, l'industrie semencière a développé des variétés tolérantes à la rhizomanie, ou plus précisément au BNYVV de plus en plus performantes. L'évolution des ventes belges de ces variétés ne s'est réellement développée qu'à partir de 2002 et ne représentait encore que 15% en 2003. Actuellement, 50% des betteraves vendues sont tolérantes au BNYVV.

Bien que la sélection pour la résistance à la rhizomanie se soit d'abord focalisée sur la résistance à BNYVV, la résistance au vecteur, *P. betae*, a été envisagée comme une solution alternative. Une résistance assez forte envers *P. betae* a été identifiée dans des espèces de betteraves sauvages *Beta procumbens* et *B. patellaris*. Mais le développement de variétés tolérantes basées sur ce type de résistance n'est pas encore au point.

A long terme, on pourrait envisager des variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie. Aucune betterave transgénique résistante à la rhizomanie n'est actuellement commercialisée et ne le sera certainement pas avant 2010 en Europe. Les variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie pourraient présenter l'avantage d'induire une résistance plus forte des betteraves face à la maladie. De même, un dépassement de la résistance est moins probable que pour les variétés classiques. L'obtention des variétés à double ou triple résistance (rhizomanie-rhizoctone, rhizomanie-nématode) ou (rhizomanie-rhizoctone-cercosporiose) avec des performances de haut niveau pourrait être plus facile et plus rapide par transgénèse que par sélection classique.

Pour l'introduction des betteraves transgéniques dans les pratiques culturales belges, il faudra que celles-ci présentent un avantage technique ou financier important par rapport aux variétés tolérantes classiques. En effet, afin d'assurer un approvisionnement en sucre traditionnel et en sucre issu de betteraves transgéniques, la ségrégation de la filière betteraves-sucre serait indispensable mais entraînerait des coûts supplémentaires pour le secteur de la production sucrière. Il faudra également régler le problème de la co-existence des trois types d'agriculture à savoir biologique, traditionnelle et transgénique et alléger le cadre réglementaire régulant les autorisations de dissémination de plantes génétiquement modifiées. De même, les craintes du public, les protestations des agriculteurs biologiques face aux betteraves transgéniques ne sont pas à négliger.

La lutte biologique semble méconnue de la plupart des acteurs. Des recherches concernant ce moyen de lutte sont en cours mais les méthodes développées ne sont pas, pour l'instant, utilisées à grande échelle en agriculture. Dans le long terme, on pourrait imaginer des:

- Agents antagonistes contre les spores de *P. betae*
- Cultures-piège qui retiendraient le vecteur qui y libérerait BNYVV laissant par conséquent les betteraves sucrières indemnes.
- Mesures ayant un impact sur *P. betae*, comme les amendements calciques et organiques qui influencent le pH et la fumure.
- Protection croisée (Cross-protection) qui consiste à infecter la plante à protéger avec un autre virus protecteur proche du virus agresseur avant que celui-ci n'infecte la plante à son tour. La stratégie de protection est basée sur le fait que le virus protecteur va empêcher ou interférer avec l'infection du virus agresseur.

Vu le peu d'engouement et de recherches actuellement à ce sujet, il est peu probable que ces méthodes soient employées.

---

<sup>31</sup> Cette étude de cas se base principalement sur un travail original de Mélanie Braibant

### 3.1. La problématique : Rhizomanie en culture de betteraves

#### 3.1.1. Description du problème

##### a. La culture

La culture betteravière occupe une place importante dans l'économie agricole belge en terme de surfaces cultivées mais aussi par la haute rentabilité<sup>32</sup> à l'hectare qu'elle atteint. En 2003, 97.177 hectares de betteraves sucrières étaient recensés, soit environ un septième de la surface totale des grands cultures en Belgique (Institut National de Statistiques, 2004). La culture des betteraves sucrières occupe aujourd'hui environ 15.000 agriculteurs belges (Confédération des betteraviers Belges, CBB, 2003) et l'industrie sucrière belge est la première industrie alimentaire utilisatrice de matière première nationale (Raffinerie Tirlémontoise, 2003). Tout le sucre nécessaire à la consommation nationale est entièrement obtenu grâce aux cultures betteravières belges. Le degré d'autosuffisance était en effet de 146.3% en 1999-2000 de sorte que le commerce extérieur du sucre et des produits sucrés présente un solde positif (Bosschaert L. and Muermans L., 2001).

Condamnée par l'OMC, l'Union européenne s'est engagée, via la proposition de la Commission (confirmée fin juin dernier), à réformer son secteur sucrier. Cette réforme prévoit une baisse progressive d'un tiers des prix européens garantis d'ici fin 2007 ainsi qu'une diminution des quotas de betteraves. Cette réforme laisse le secteur dans une grande incertitude vis-à-vis du futur (Lamotte P., 2005).

##### b. La filière de la betterave

La filière est constituée de cinq catégories d'acteurs (Figure 3).

- les producteurs (ou betteraviers),
- les sucreries,
- les semenciers,
- les centres de recherche et les organisations de betteraviers et de fabricants de sucre).

Les **betteraviers** pour produire au mieux vont adapter leurs méthodes culturales en fonction des conseils et d'études des **centres de recherche** tels que l'IRBAB, Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la betterave. Le but de l'IRBAB est d'améliorer la culture de la betterave sucrière en recherchant des paramètres agronomiques optimaux, selon le contexte économique corrélé à l'ensemble des problèmes betteraviers. Leur choix variétal est donc tributaire des conseils de l'IRBAB (listes des variétés recommandées) mais également des **sucreries**. (Cf 3.2.4). Les **sucreries** achètent les betteraves aux betteraviers et transforment les betteraves en sucre. Les **sucreries** s'occupent également de l'arrachage et du transport des betteraves. En Belgique on compte une petite dizaine de sucreries Burgette, Tirlémont, Wanze, Fontenoy, Veurne... Les **semenciers** créent des variétés pour que celles-ci soient vendues. Ils doivent tenir compte des exigences des sucreries (richesse et l'extractibilité<sup>33</sup> élevées), de l'IRBAB mais également des problèmes phytosanitaires et de la demande des marchés. Les **organisations** tels que la **confédération de betteraviers Belges (CBB)** représente et défend les intérêts des **betteraviers**. Les organisations participent également à la vulgarisation des résultats des recherches menés par l'IRBAB et de l'actualité politiques et économique du secteur (ex. publication Le betteravier). La **SUBEL**, représente les fabricants de sucre de Belgique au sein d'associations patronales du monde régional, fédéral et européen, elle exécute des études et prépare de dossiers politiques. (Subel, 2005).

<sup>32</sup> Rendements moyen de 60 à 65 tonnes de betteraves/ha (IRBAB, 2004) et 46, 68€/tonne de betterave= 2 620-2 838 €/ha de betteraves pour 1080€-1350€/ha de froment (120-150€/tonne de froment et rendement 9t/ha)

<sup>33</sup> Extractibilité est la facilité avec laquelle le sucre est extrait de la betterave sucrière. Au plus, une betterave est extractible, au plus il est facile d'en extraire le sucre.

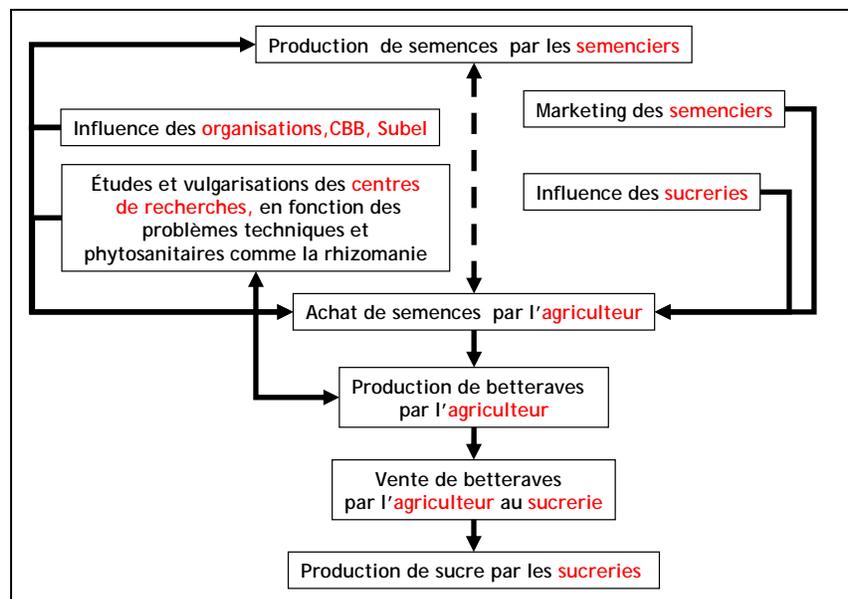


Figure 3. La filière de la betterave en Belgique

### c. Le problème technique : la rhizomanie (Figure 5)

La rhizomanie est une maladie des betteraves qui interrompt la croissance de la racine principale et engendre une prolifération importante des radicelles. On observe également un étranglement du pivot racinaire et un brunissement des anneaux vasculaires. Les symptômes de la rhizomanie se caractérisent au niveau des feuilles, par un **jaunissement** des nervures (rarement observé) et par un **flétrissement**. Les nouvelles feuilles présentent des pétioles allongés et dressés ou gaufrés.

Le seul responsable de la rhizomanie identifié actuellement avec certitude est le virus des nervures jaunes et nécrotiques de la betterave, BNYVV (*Beet Necrotic Yellow Vein Virus*)<sup>34</sup>.

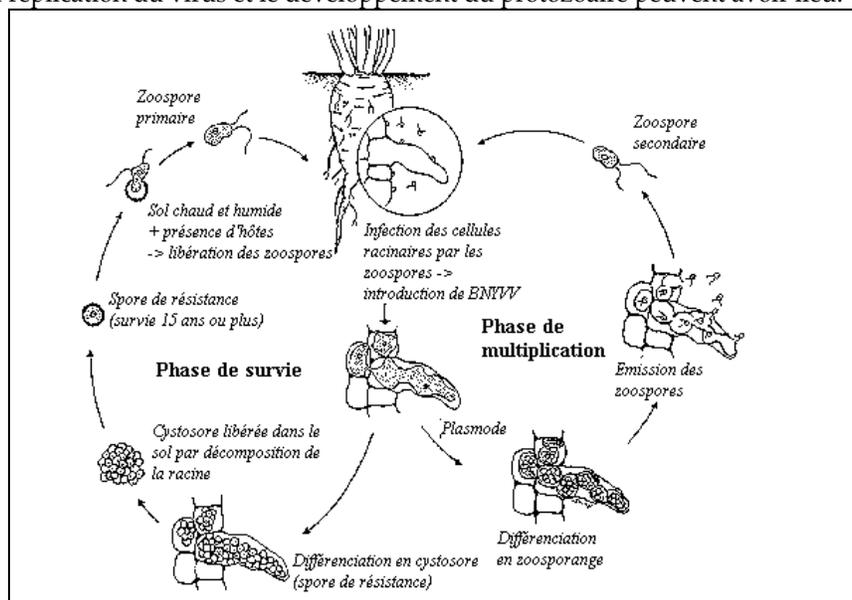
La transmission du virus est assurée par un protozoaire du sol, *Polymyxa betae* Keskin. Sous des conditions favorables, le cycle du vecteur (Encadré 1) peut se répéter plusieurs fois en une saison avec pour conséquence une forte augmentation du niveau de *P. betae*. La multiplication et le déplacement de ce vecteur, permettent au virus de se propager rapidement et facilement. *P. betae* est adapté pour survivre en absence d'hôte, pendant plus de 30 ans (Giltrap et al., 2001). Et par conséquent, ce protozoaire est présent dans la quasi totalité des surfaces betteravières mondiales (Asher M.J.C., 1999). Il a été démontré qu'au moins deux à trois cultures de betteraves sont nécessaires entre la contamination de la parcelle et la détection des premiers symptômes (Giltrap et al., 2001). Cette « période de latence » de six à neuf ans (suivant la rotation mise en œuvre) signifie que la maladie peut se propager bien avant qu'elle ne devienne apparente (Giltrap et al., 2001). Les symptômes permettant de détecter la rhizomanie peuvent aussi bien être observés au niveau foliaire qu'au niveau racinaire. Cependant, pris séparément, les symptômes foliaires et racinaires ne constituent en aucun cas une preuve certaine de la présence de la maladie.

<sup>34</sup> Des questions restent posées quant au rôle joué par deux autres virus également transmis par *Polymyxa betae* et dont la présence a été constatée dans les betteraves sucrières infectées par le BNYVV : le BSBV (*Beet Soil Borne Virus*) et le BVQ (*Beet Virus Q*) (Schmit J.-F. et al., 2002)

Alors qu'elle se développait déjà tout autour de notre pays : en France depuis 1973, en Allemagne depuis 1974 et aux Pays-Bas depuis 1983, la rhizomanie a été découverte pour la première fois en Belgique en 1984 dans la région de Doel (région des polders anversois). Début des années 90, des taches localisées touchées par la rhizomanie ont commencé à apparaître à différents endroits et après la moitié des années 90, la rhizomanie a progressé un peu partout en Belgique. En 2002, un champ sur quatre est contaminé (Schmit J.-F. et al., 2002). Cette maladie concerne toutes les régions du pays, avec une évolution variable d'une région à l'autre et même au sein d'une même parcelle. À travers le monde, la rhizomanie a été décelée dans toutes les régions de culture intensive de la betterave: Europe, Amérique du Nord et Asie (Tamada, 1999).

**Encadré 1 : le cycle de vie de *Polymyxa betae***

Cycle de vie: L'infection des racines par *P. betae* (Figure 4) débute lorsque les conditions sont favorables à la germination des spores de résistance de ce protozoaire. Ces spores vont germer et libérer des zoospores primaires. Toutes les spores de résistance ne vont pas germer, ce qui provoque le maintien d'inoculum<sup>35</sup> dans le sol. Les zoospores primaires sont attirés par les polysaccharides émis par la racine et atteignent les radicelles de la betterave grâce au mouvement coordonné de leurs deux flagelles. Lorsque le contact avec une radicelle a lieu, les flagelles disparaissent et les zoospores primaires déversent leur contenu cellulaire (qui peut contenir le virus BNYVV) dans la cellule-hôte. Après 16 heures d'incubation, on peut déjà observer un jeune plasmode (masse cytoplasmique renfermant de nombreux noyaux) qui va se différencier par la suite en fonction des conditions du milieu soit en cystosore (spore de résistance) si les conditions sont défavorables au développement du *P. betae*, soit en zoosporange qui donnera des zoospores secondaires prêtes à envahir d'autres cellules racinaires de la betterave. La rhizomanie se développera si les zoospores primaires infectant la racine contiennent le virus BNYVV et introduisent celui-ci dans la cellule-hôte. Une fois le contenu cellulaire introduit, la réplication du virus et le développement du protozoaire peuvent avoir lieu.



**Figure 4 : Cycle de vie de *P. betae* dans une betterave sucrière (Franc G. et al., 1993)**

<sup>35</sup> Inoculum : quantité infectieuse

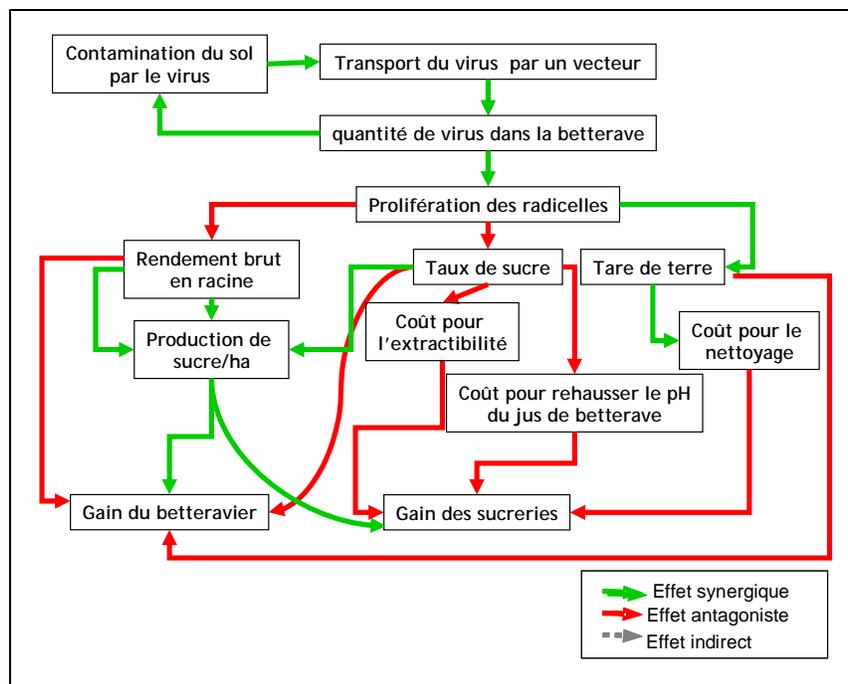


Figure 5 : Le problème de la rhizomanie en culture de betteraves

### 3.1.2. Implications (Figure 5)

#### a. Implications agricoles

Les **betteraviers** rencontrent des problèmes lors de l'arrachage de champs contaminés, par la présence d'un chevelu racinaire important autour de la racine principale chez les betteraves infectées. Lors de l'arrachage, des problèmes de décolletage peuvent également survenir. Etant donné les différences de hauteur de feuillage entre les zones infestées et les zones saines de la parcelle, un réglage plus fréquent de l'effeuilleuse est nécessaire.

**Pour les sucreries**, la production de sucre à partir de betteraves contaminées demande une charge de travail plus élevée. En effet, le nettoyage des racines est plus important par l'augmentation de la tare de terre. L'extractibilité<sup>36</sup> des betteraves contaminées est plus faible et un supplément d'acidité se retrouve dans le jus de betteraves infestées par rapport au jus de betteraves saines. Afin de rehausser le pH, une addition de soude est nécessaire à la neutralisation de ce supplément d'acidité.

Les **betteraviers et les sucreries** doivent également veiller à éviter les contaminations des champs sains par le virus en empêchant un apport extérieur de substances contaminées, par le transport de terre et d'eau contaminée par des spores de *Polymyxa betae* infectées de BNYVV.

Les **semenciers** doivent veiller à la non contamination des semences. Pour ce faire, elles doivent être obtenues dans des champs exempts de rhizomanie.

Les **centres de recherche** afin d'étudier la rhizomanie doivent effectuer des analyses qui demandent une certaine technicité comme des tests sérologiques (test ELISA) et des RT-PCR (Reverse Transcriptase-Polymerase Chain Reaction) en laboratoire. En effet, la rhizomanie étant une association

<sup>36</sup> Extractibilité est la facilité avec laquelle le sucre est extrait de la betterave sucrière. Au plus, une betterave est extractible, au plus il est facile d'en extraire le sucre.

d'un virus et d'un vecteur, elle est complexe à analyser et les symptômes ne permettent pas, dans tous les cas, de détecter le virus. (Meunier A. et al., 2000)

### **b. Implications économiques**

La rhizomanie est une maladie économiquement<sup>37</sup> importante aussi bien pour les betteraviers que pour l'industrie sucrière. La quantité de sucre et sa qualité, en cas de contamination par la rhizomanie diminuent pour les mêmes surfaces d'approvisionnement. Le rendement financier des betteraviers est diminué par une baisse de rendement brut en racines pouvant aller jusqu'à 80%, par une baisse de richesse pouvant aller jusqu'à 60% (Schlosser E., 1988), ainsi que par une augmentation de la tare de terre, causées par la rhizomanie. Le rendement et le taux de sucre des variétés classiques peuvent baisser respectivement de 60-70 T/ha à 20 T/ha et de 18 à 8 % (Decoin M.,1997).

Pour les sucreries, le coût de la fabrication du sucre à partir de betteraves contaminées est plus élevé, suite à des problèmes d'impureté, d'acidité par la diminution d'extractibilité et par l'augmentation du sucre inverti<sup>38</sup>. La teneur en sucre inverti plus élevée dans les betteraves infestées a pour conséquences d'augmenter l'acidité dans le jus de betterave. Afin d'en rehausser le pH, une addition de soude est nécessaire à la neutralisation de ce supplément d'acidité. Cette soude limite la capacité de traitement. Cela entraîne par conséquent des coûts supplémentaires suite à des transformations mécaniques et organisationnelles (KWS France,1997; KWS France,2002). De même, les coûts de nettoyage sont augmentés par l'augmentation de la quantité de terre véhiculée par le chevelu racinaire des betteraves infectées. Vu la concurrence étrangère élevée au niveau du sucre, il est inconcevable d'augmenter le prix du sucre pour compenser le coût de la rhizomanie.

Les méthodes de détection du virus (test ELISA ou RT-PCR) sont coûteuses et représentent un budget pour les centres de recherches et les organisations qui réalisent ces méthodes afin d'évaluer la progression de cette maladie.

### **c. Implications environnementales**

La rhizomanie n'a pas d'impact sur l'environnement.

### **d. Implication sur la santé humaine**

La rhizomanie n'a pas d'impact sur la santé humaine.

**La gravité de la rhizomanie réside dans son caractère épidémique et dans la quasi impossibilité d'entraver sa dissémination due aux caractéristiques du vecteur, *Polymyxa betae*, et aux nombreux moyens de transmission de la maladie.**

## **3.2. Stratégies de lutte actuelles**

### **3.2.1. Description des stratégies**

La stratégie « principale », celle qui est « principalement » utilisée par les producteurs en agriculture conventionnelle est la résistance variétale. Les stratégies « secondaires » sont celles qui sont très peu considérées dans la filière traditionnelle.

<sup>37</sup> 7,5 tonnes de betteraves donne 1 tonne de sucre. la Commission européenne rachète à un prix fixé le sucre à 630€/tonne de sucre (pour 2004-5) (Lamotte P. 2005). Le betteravier reçoit 30-40€/tonne de betterave. Une perte de 40T/ha équivaut à une perte de 120-160€/ha

<sup>38</sup> Sucre inverti :Saccharose ayant subi l'inversion, c'est-à-dire la transformation du saccharose en glucose et en lévulose par hydrolyse.

## a. Stratégies principales

- **Variétés tolérantes au virus**

La méthode la plus efficace connue actuellement et la plus couramment utilisée est l'utilisation de variétés tolérantes à la rhizomanie, ou plus précisément au BNYVV. Les variétés commerciales sont dites « tolérantes<sup>39</sup> », elles ne présentent pas de symptômes de rhizomanie malgré leur contamination par BNYVV. Elles contiennent également une plus faible quantité de virus dans leur racine que les variétés sensibles (Buttner et al., 1995). En effet, les betteraves dites « tolérantes » plantées en sol contaminé sont porteuses de BNYVV mais en entravent la multiplication (Decoin M., 1997).

Les variétés tolérantes ont maintenu les rendements à un niveau adéquat et ont permis de continuer la culture de la betterave sucrière dans des pays où la rhizomanie avait atteint des proportions épidémiques comme les Pays-Bas, la France, l'Allemagne, le Japon (Biancardi et al., 2002).

L'évaluation de variétés betteravières en champs infectés débuta en 1958 (Bongiovanni G.C. and Lanzoni L., 1964). Le résultat de ces essais peut être considéré comme le premier indice d'une variabilité génétique de la résistance des betteraves sucrières à la rhizomanie. Durant les 35 dernières années, la sélection a fortement réduit les dommages causés par la rhizomanie dans les champs de betteraves sucrières (Biancardi et al., 2002). Les premiers hybrides tolérants à la rhizomanie réellement efficaces étaient basés sur le gène Rizor. Ils firent leur apparition dans les années 80 en Europe (Meulemans M. et al., 2003). Ensuite, en 1983, des progrès encore plus importants ont été réalisés avec l'arrivée du gène Holly, appartenant à une lignée de sélection de la Holly Sugar Compagny (USA) (Biancardi et al., 2002). La résistance Holly est maintenant utilisée commercialement dans le monde entier (Biancardi et al. 2002).

**Tableau 18 : Principes agronomiques des stratégies principales contre la rhizomanie**

Stratégie principale	Principes agronomiques
Variétés tolérantes au virus	Utilisation de variétés les plus tolérantes possibles au virus afin de minimiser l'impact de la rhizomanie

## b. Stratégies secondaires : les méthodes préventives

- **Adaptation des pratiques culturales**

L'adaptation des pratiques culturales est une pratique préventive.

- Favoriser les rotations longues

La rhizomanie comme beaucoup d'autres maladies reflète une fatigue du sol et un travail excessif de la terre. Des rotations courtes avec des plantes hôtes vont augmenter fortement le niveau de l'inoculum (Rush, 2003). Cependant, une fois que la rhizomanie provoque des dégâts importants dans le champ, allonger les rotations n'est pas une mesure de contrôle efficace de la maladie et son éradication est pratiquement impossible (Giltrap et al., 2001). En effet, les spores de résistance de *Polymyxa betae* peuvent survivre plus de trente ans dans le sol, protégeant toute particule virale contenue (Giltrap et al., 2001). C'est pourquoi, il n'est pas surprenant qu'une modification de la rotation, dans laquelle des betteraves seraient plantées tous les cinq ans au lieu de tous les trois ans, ne se solde pas par un déclin de la densité de l'inoculum dans le sol (Scholten O. and Lange W., 2000).

---

<sup>39</sup> Un améliorateur utilisera le terme de résistance pour les variétés qui ne présentent pas une baisse de rendement sous l'effet de la maladie. Les scientifiques, quant à eux, utiliseront pour cela le terme de tolérance, le terme de résistance ne sera accordé qu'aux variétés non-infectées.

Cependant, des rotations plus longues que trois ans peuvent aider à diminuer le taux de multiplication de l'inoculum dans les parcelles infectées (Giltrap et al., 2001).

- Maintien de bonnes structures et éviter la compaction du sol

Des sols lourds avec une mauvaise structure et des couches de compaction qui ralentissent le drainage et retardent la croissance racinaire, favorisent le développement de la maladie. En effet, les pratiques qui aident à la conservation d'un bon drainage, au maintien d'une bonne structure du sol et au décompactage comme le sous-solage<sup>40</sup> rendent les conditions environnementales défavorables au développement de *P. betae*.

- Positionnement du semis

Plus l'infection aura lieu tôt, plus la maladie sera sévère et les pertes de rendement seront élevées. Un semis hâtif permet d'échapper à une infection précoce (Giltrap et al., 2001). En effet, des plantes semées tôt dans l'année rencontrent des conditions de température défavorables au vecteur *P. betae*. En dessous de 10°C, les spores de résistance de *P. betae* ne germent pas tandis que les semences de betteraves sucrières germent à partir de 5°C.

Mais le décalage du semis n'est pas toujours possible. Par exemple, lorsque les agriculteurs doivent ressemer dans des sols chauds, le risque d'infection sévère est beaucoup plus élevé que lors de leur premier semis en conditions plus froides.

**Tableau 19: Principes agronomiques des stratégies secondaires contre la rhizomanie**

Stratégies secondaires	Principes agronomiques
Adaptation des pratiques culturales :	Rendre les conditions défavorables au développement de <i>Polymyxa betae</i> et au virus en jouant sur la structure du sol, l'humidité,...
1) Rotation longue	Le temps entre deux cultures de betteraves doit être long afin d'éviter la fatigue du sol, diminuer le niveau d'inoculum
2) Maintien de bonnes structures	Les pratiques qui aident à la conservation d'un bon drainage, au décompactage,... rendent les conditions environnementales défavorables au développement de <i>P. betae</i>
3) Positionnement du semis	un semis hâtif permet d'échapper à une infection précoce

### 3.2.2. Etats des lieux de l'utilisation des stratégies

La principale stratégie utilisée aujourd'hui est basée sur l'utilisation de variétés tolérantes à la rhizomanie, plus précisément au virus.

Même si le problème de la rhizomanie se propageait à travers la Belgique depuis le début des années 1990, l'utilisation des variétés tolérantes à la rhizomanie ne s'est développée qu'à partir de 2002, année de la forte augmentation des champs contaminés par la rhizomanie, en Belgique. Les semences de betteraves tolérantes ne représentaient que 1 à 3% du marché total en 2000, le pourcentage de variétés tolérantes à la rhizomanie vendues sur le territoire belge en 2002 était de 4,7% et de 13 à 15% en 2003. En 2004, 26,7% des betteraves sucrières semées, en Belgique étaient des variétés dites « tolérantes ». L'extension de la rhizomanie est telle que le pourcentage en 2005 devrait être proche des 50% (Hermann O., 2005).

<sup>40</sup> Sous-solage :Défoncement des sous-sols compacts, sans les retourner, au moyen d'instruments tranchants (sous-soleuses), fouillant le sol à des profondeurs généralement comprises entre 30 et 60 cm à intervalles de 60 à 150 cm.(Schut P., 2005)

### 3.2.3. Avantages et inconvénients des différentes stratégies

#### a. Les adaptations culturelles

Les adaptations culturelles ne peut être utilisées qu'en complément d'un moyen de lutte mais ne peut, à elle seule, résoudre le problème de la rhizomanie. Il s'agit d'une pratique préventive et non curative.

#### b. La résistance variétale

Les variétés tolérantes obtiennent un rendement en racine et une richesse en sucre en champ contaminé, nettement supérieurs à ceux obtenus par des variétés classiques dans de mêmes conditions.

Après de nombreuses années de sélection, les rendements en racine et en sucre aussi bien que la qualité des variétés tolérantes ont maintenant atteint un niveau équivalent à celui des variétés sensibles (Scholten O. and Lange W., 2000). De nombreux défauts tels que la sensibilité à la montaison, une pureté de jus médiocre, une production et une richesse plus faible... ont désormais été résolus. Le niveau de production des betteraves tolérantes en terrain sain est devenu parfaitement comparable à une variété classique normale, depuis 2003-2004 (Wauters A., 2004).

La majorité des variétés tolérantes présente une meilleure résistance à la cercosporiose, *Cercospora beticola* et à la ramulariose. De même, certaines variétés tolérantes à la rhizomanie peuvent être également résistant aux nématodes ou au rhizoctone brun. Toutefois, le développement de l'oïdium, *Erysiphe betae* est plus important dans les variétés tolérantes à la rhizomanie.

Le niveau d'inoculum dans le sol est toujours présent et continue à augmenter, mais plus lentement avec les variétés tolérantes (Scholten O. and Lange W., 2000). C'est pourquoi on espère que de la culture de ces variétés pourra résulter la stabilisation du nombre d'unités infectées dans le sol et la diminution du taux de propagation de la maladie (Asher M.J.C. and Kerr H., 1996). Certains acteurs interrogés pensent même qu'en plus de le stabiliser, la culture des variétés tolérantes pourrait diminuer l'inoculum dans le sol.

Toutefois, l'utilisation de variétés tolérantes exerce une pression de sélection sur le virus. Des craintes concernant l'agressivité du virus de type P<sup>41</sup> ainsi qu'un dépassement potentiel de la résistance des variétés tolérantes dû à une mutation du virus ne sont toutefois pas à exclure. Il a été démontré que le virus de type P peut infecter des betteraves tolérantes à la rhizomanie (Duquenne F.-X., 2002). Cette expression de la maladie en présence de variétés tolérantes est considérée comme une menace potentielle pour les producteurs (Harju V. and Richard-Molard M., 2002).

Les variétés tolérantes présentent également le désavantage de moins bien recouvrir le sol. En effet, la majorité des variétés classiques sont triploïdes (3n) et celles-ci ont une masse foliaire plus importante et recouvrent plus vite le sol; contrairement aux variétés tolérantes (principalement diploïdes (2n)) qui ont un port plus érigé, avec de plus longs pétioles et de plus petits limbes. Le recouvrement du sol plus lent des variétés tolérantes entraîne une gestion des mauvaises herbes plus difficile que dans le cas d'un semis de variétés classiques.

La faiblesse des variétés tolérantes concernant la vigueur à levée était considérée, en 2002 par l'ITB, comme la seule infériorité de ces variétés comparées aux variétés classiques avec un point négatif également pour la richesse (Institut Technique Français de la betterave industrielle, ITB, 2002). En 2004, la levée des variétés tolérantes recommandées par l'IRBAB est considérée comme bonne en

---

<sup>41</sup> Les isolats de BNYVV se répartissent en trois types de virus : A, B et P sur base des séquences nucléotidiques (Kruse et al. 1994).

général, mais inférieure pour trois de ces dix variétés : Canyon, Chance et Celesta (Wauters A., 2004). Mais, les variétés tolérantes seraient dans certains cas encore perçues comme ayant une vigueur à la levée plus faible.

Malgré l'existence des variétés très riches au sein des variétés tolérantes<sup>42</sup>, ce nombre semble encore insuffisant. Toutefois, le niveau de richesse de variétés tolérantes est acceptable.

**Tableau 20 : Avantages et inconvénients des variétés tolérantes**

Avantages	Inconvénients
Niveau comparable aux variétés classiques	Sensibilité à l'oïdium
Performance supérieure en champ contaminé	Dépassement potentiel de la résistance : pression de sélection
Résistance à la cercosporiose et à la ramulariose	Couverture du sol plus faible
Teneur en BNYVV plus faible	Vigueur à la levée plus faible pour certaines variétés
Propagation de la maladie plus lent (?)	Gamme réduite de variétés riches en sucre

### **3.2.4. Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées**

#### **a. Les adaptations culturelles**

Les adaptations culturelles et les méthodes préventives sont faiblement efficaces, d'où leur faible utilisation.

#### **b. La résistance variétale**

S'il y a quelques années (2002), la vente de variétés tolérantes ne représentait que quelques pourcents des parts de marché (moins de 5%, elle est aujourd'hui en pleine expansion. Suite à l'amélioration des variétés tolérantes grâce à une sélection toujours plus poussée, l'accroissement des ventes de variétés tolérantes à la rhizomanie en Belgique correspond à la tendance actuelle de généralisation de ces variétés.

La faible utilisation des variétés tolérantes avant 2002 s'explique en partie par leur performance agronomique plus faible que les variétés classiques en champ sain, à cette époque et par la propagation de la maladie plus limitée, en Belgique, avant 2002.

#### **• Pourquoi les variétés tolérantes ne sont pas utilisées à 100% actuellement ?**

L'utilisation de variétés tolérantes à la rhizomanie, plus précisément à BNYVV connaît depuis 2002, en Belgique une hausse exponentielle. Pour 2005, l'utilisation devrait être approximativement de 50%. Le stock belge en semences de betteraves tolérantes étant limité, une utilisation de 100% n'est toutefois pas possible. Les variétés tolérantes sont proposées en priorité aux betteraviers qui ont déjà des problèmes sévères de rhizomanie (Hermann O., 2005).

Le stock limité n'est pas la seule raison de l'utilisation non totale de ces variétés. Les inconvénients (Tableau 20) de ces variétés (recouvrement plus faible, sensibilité à l'oïdium) et les caractéristiques perçues comme des inconvénients (vigueurs à la levée, faible richesse en sucre) explique également à ce phénomène.

<sup>42</sup> La variété Jump surpassait même en richesse les variétés classiques lors des essais variétaux de l'IRBAB en 2003.

Le prix des semences de variété tolérantes à la rhizomanie étant identique à celui des variétés classiques ne représente pas un frein à leur utilisation.

Le manque initial de variétés tolérantes à la rhizomanie de type riche a pu limiter la vente de ces variétés. L'écart entre la moyenne des variétés classiques et la moyenne des variétés tolérantes n'est actuellement que de 0,3 degré et il existe des variétés tolérantes très riches. Cependant, le nombre de variétés tolérantes de type riche serait encore insuffisant (Hermann O., 2005).

Pour toute nouvelle innovation, un temps d'adaptation entre la recherche et l'application est nécessaire. Les producteurs doivent en effet, s'informer sur les nouvelles stratégies. Si un betteravier n'a pas de problèmes de rhizomanie, et que son rendement avec une variété sensible est bon, celui-ci ne voudra pas changer pour une variété tolérante.

En outre, le début difficile des variétés tolérantes comparées aux variétés classiques reste encore ancré dans certaines mémoires de producteurs méfiants vis-à-vis des nouveautés. Il est difficile de leur faire changer d'opinion.

De nombreux acteurs tels que les agronomes des sucreries, les semenciers, ... influencent le choix des agriculteurs concernant le type de variété à semer. Les représentants des firmes semencières poussent certaines variétés plus que d'autres, comme les variétés vedettes de la firme. Les agronomes des sucreries proposent une large gamme de variétés à semer. Ils conseillent et orientent les betteraviers sur le choix des variétés suivant les caractéristiques du terroir. De plus, ils commandent les variétés choisies pour les agriculteurs. Initialement, les variétés tolérantes à la rhizomanie ayant une moindre richesse et une extractibilité<sup>43</sup> plus faible, les sucreries ne poussaient que les betteraviers ayant déjà de la rhizomanie à semer ces variétés. Actuellement, vu l'évolution des performances de ces variétés, ces problèmes n'entrent plus en ligne de compte.

### **3.3. Innovations**

#### **3.3.1. Description des innovations**

##### **a. Génie génétique**

- ***Variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie***
  - Principe agronomique

Dans les perspectives de mise au point des betteraves transgéniques résistantes à la rhizomanie, trois modifications aboutissant à différents mécanismes de résistance ont été réalisées puis testées aussi bien en laboratoire qu'en champ. Une de ces stratégies concerne l'utilisation de séquences de gènes codant pour la protéine de capsid du virus BNYVV (CP ou Coat Protein) qui sont exprimées dans la plante.

Une autre stratégie de résistance à la rhizomanie est basée sur l'insertion dans la betterave de séquences nucléotidiques issues du BNYVV et modifiées de façon à ne plus être fonctionnelles pour le virus, tout en conférant un certain niveau de résistance à l'infection virale. La plante est rendue résistante au BNYVV en empêchant le mouvement du virus de cellule en cellule. Dans ce but, un gène du « triple gene block » essentiel au mécanisme de mouvement du virus, a été modifié et isolé, de sorte que son expression dans la plante perturbe le mouvement du virus de cellule en cellule (Lauber

---

<sup>43</sup> Extractibilité : facilité avec laquelle le sucre est extrait de la betterave sucrière

E. et al., 2001). Cette construction transgénique a fait l'objet des essais réalisés en 2002, en Belgique par Advanta.

Un troisième type de résistance a également été mis au point et testé par la firme Syngenta. La résistance à la rhizomanie est induite par l'insertion d'un gène de résistance à la rhizomanie, Rzm, dont l'interaction sur le système de multiplication du virus conduit à la réduction du développement de BNYVV dans la plante (Syngenta., 2005).

- Etats de développement

De sa création à sa culture à grande échelle, le développement d'une plante transgénique, quelle qu'elle soit, passe par trois stades différents : l'expérimentation en laboratoire, l'expérimentation en champ et la mise en culture. Le stade expérimentation en laboratoire est dépassé, les betteraves transgéniques sont au stade de l'expérimentation au champ. En Europe, depuis 1991, 247 notifications autorisant la dissémination de betteraves transgéniques à des fins expérimentales ont été accordées (Joint Research Centre, 2004). Ces essais ne concernaient pas que la résistance aux maladies mais également la tolérance aux herbicides, au gel ou au stress... En Belgique, treize notifications ont été délivrées par le Service de Biosécurité et Biotechnologie belge (SBB) (Belgian Biosafety Server, 2004). Sur ces treize essais, seulement une notification concernait l'expérimentation en champ d'une betterave transgénique résistante à la rhizomanie réalisée, en 2002, par la SES Europe – Advanta (Belgian Biosafety Server, 2004). Le mécanisme de résistance choisie pour cette betterave a été l'insertion du gène du « triple gene block » modifié (cfr. Principe agronomique). Pour l'instant, d'un point de vue légal, toute mise en culture de betterave transgénique est formellement interdite.

## **b. Amélioration variétale classique**

- **Les variétés résistantes au vecteur du virus, *Polymyxa betae***

- Principe agronomique

Bien que la sélection pour la résistance à la rhizomanie se soit d'abord focalisée sur la résistance à BNYVV, la résistance au vecteur, *P. betae*, a été envisagée comme une solution alternative. Une résistance assez forte envers *P. betae* a été identifiée dans des espèces de betteraves sauvages *Beta procumbens* et *B. patellaris* (Rush, 2003). Par croisement classique, cette résistance peut se retrouver dans des betteraves sucrières cultivées.

- Etats de développement

Des études ont encore lieu afin d'incorporer une résistance au vecteur *P. betae* dans des variétés agronomiques acceptables. Pour l'instant, les résultats ne sont pas encore intéressants sur le plan technico-économique (Rush, 2003).

- **Résistance à BNYVV à partir d'espèces sauvages de betteraves**

- Principe agronomique

La résistance à BNYVV n'a pas seulement été identifiée dans le matériel de sélection disponible en Europe et aux Etats-Unis mais aussi dans des espèces sauvages de betteraves. La résistance au virus a également été identifiée dans l'espèce sauvage *Beta vulgaris ssp. Maritima* (Buttner et al., 1995). Une résistance à BNYVV a aussi été décelée dans *Beta corolliflora*, *Beta intermedia* et *Beta lomatogona*, appartenant toutes à la section *Corollinae* (Paul et al., 1993).

### c. Lutte chimique

#### o Principe agronomique

Une méthode réellement efficace pour contrôler la rhizomanie est la désinfection du sol par fumigation (Harveson R. and Rush C.M. 1994; Henry et al. 1992; Martin F. and Whitney E. 1990). Une désinfection de sol avec des substances chimiques telles que le bromure de méthyle ou le dichloropropène diminue de manière drastique l'incidence et la sévérité de la maladie et augmente les rendements (Martin F. and Whitney E. 1990; Rush 2003). Aucun fongicide n'est utilisé contre *P. betae*.

### d. Lutte biologique

#### o Principe agronomique

Les différentes solutions proposées par la lutte biologique sont :

- Agents antagonistes. Des champignons hyperparasites du genre *Trichoderma* sont susceptibles de parasiter les spores de *Polymyxa betae*. Les amibes pourraient également être des prédateurs directs du *P. betae* (INRA: Institut National de la recherche agronomique- France, 2004).
- Culture-piège. Un des moyens de lutte envisagé pourrait être l'utilisation de plantes plus attractives pour *P. betae* que les betteraves sucrières. Celles-ci retiendraient le vecteur qui y libérerait BNYVV laissant par conséquent les betteraves sucrières indemnes.
- Protection croisée (Cross-protection). La protection croisée consiste à infecter la plante avec un autre virus protecteur proche du virus agresseur avant que celui-ci n'infecte la plante à son tour. La stratégie de protection est basée sur le fait que le virus protecteur va empêcher ou interférer avec l'infection du virus agresseur. Le *Beet soilborne mosaic virus* (BSBMV) est un candidat approprié pour la protection croisée car il présente de nombreuses similitudes avec BNYVV (virus de la rhizomanie) et cause des dégâts moins sévères que celui-ci (Mahmood and Rush, 1999). Il a été démontré que des plantes pré-infectées par BSBMV étaient moins atteintes par la maladie et que la concentration de BNYVV (virus de la rhizomanie) y était moindre que dans les plantes non protégées par BSBMV (Mahmood and Rush, 1999).
- Résistance systémique induite (ou acquise). Le principe de la résistance systémique induite est d'activer des mécanismes de défenses naturellement présents dans la plante mais latents. Il s'agit d'augmenter la capacité de la plante à se défendre contre un large spectre d'agents pathogènes.
- Mesures ayant un impact sur la microflore du sol. Les pratiques phytotechniques telles que les amendements calciques et organiques influencent le pH et les taux de calcium et de magnésium du sol. Or, une relation entre ceux-ci et le potentiel infectieux a été démontrée (Goffart and Maraite H., 1991). L'addition de sulfure afin de réduire le pH du sol<sup>44</sup> en dessous de 5,5 réduit l'infection racinaire par *P. betae*. Par ailleurs, l'irrigation des betteraves sucrières a une influence sur la sévérité de la maladie et le rendement betteravier, mais elle est rarement utilisée en Belgique.

#### o Etats de développement

Des recherches concernant ce moyen de lutte sont en cours mais les méthodes développées ne sont pas, pour l'instant, utilisées à grande échelle en agriculture.

---

<sup>44</sup> Toutefois, le pH optimum de la betterave sucrière se situant aux alentours de 7-7.5, une acidité de sol inférieure à 6,5 est nuisible à cette culture.

## e. Lutte intégrée

### o Principe agronomique

Il a été démontré que la rhizomanie est aujourd'hui présente dans toutes les régions de Belgique mais pas dans toutes les parcelles. Une gestion intégrée de la maladie pourrait compléter la stratégie actuelle basée uniquement sur l'emploi de variétés tolérantes. Des stratégies comme la lutte chimique ou biologique visant à gérer le potentiel infectieux pour essayer de le maintenir faible ou de le stabiliser, sont également importantes. Le rôle du chaulage et d'autres pratiques permettant de contrôler le pH et la teneur en calcium du sol est discuté au sein d'une lutte intégrée contre la rhizomanie.

## f. Innovation institutionnelle

Les recommandations de l'IRBAB<sup>45</sup> sont considérées comme des innovations institutionnelles, vu qu'elles tentent d'apporter des solutions contre la rhizomanie en favorisant les méthodes les plus efficaces contre la rhizomanie. En effet, l'IRBAB établit chaque année, suite à ces essais variétaux, la liste des variétés recommandées (Encadré 2). Cette liste accompagnée des tableaux des résultats pour différentes variétés de rendement, de richesse, de levée, de montées,...en présence ou en absence de rhizomanie sont présentées aux agronomes, aux semenciers et aux producteurs. Le producteur choisira parmi la liste des variétés recommandées. De plus, l'IRBAB a recommandé pour le semis 2004 de « semer une variété tolérante à la rhizomanie **dans toutes** les parcelles où la maladie a été détectée ou est soupçonnée».

À partir de 2005, toutes les variétés en demande à l'inscription au catalogue national des variétés devront être tolérantes à la rhizomanie (Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave, IRBAB, 2005).

---

<sup>45</sup> IRBAB : Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave, son but est d'améliorer la culture de la betterave sucrière en recherchant des paramètres agronomiques optimaux, selon le contexte économique corrélé à l'ensemble des problèmes betteraviers. C'est actuellement financé par les fabricants de sucre (depuis 1932), par les betteraviers (depuis 1968) et, selon les conventions de recherches, par les ministères régionaux de l'Agriculture et via des contrats pour tiers. (Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave (IRBAB) 2004).

## Encadré 2 : la liste des variétés recommandées

L'IRBAB a changé la composition de sa liste de variétés recommandées de betteraves sucrières. Les variétés ne sont plus reprises dans la liste « verte » qui englobe toutes les variétés recommandées ayant au moins deux années de commercialisation et dans la liste « jaune » qui est constituée de toutes les variétés provisoirement recommandées. La liste actuelle (2005) est élaborée avec les variétés recommandées, divisée en trois parties : une partie de variétés « classiques » recommandées pour des terres saines (sans rhizomanie), une deuxième partie variétés rhizomanie recommandées pour des terres avec doute de rhizomanie et une troisième partie les variétés dites spéciales recommandées pour un usage spécifique (terres à forte infestation de rhizoctone brun ou de nématodes). Seules des variétés commercialisées depuis 2004 et ayant pu être testées à partir de lots de semences suffisamment grands peuvent être reprises à la liste recommandée. Ces variétés sont évaluées sur base de leurs résultats en essais au cours des trois dernières années (rendement moyen, variabilité entre champs/années, tolérances, etc.) (Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave, IRBAB, 2005).

### 3.3.2. Synthèse des principes agronomiques des innovations

Tableau 21 : Principes agronomiques des innovations

Voies d'innovations		Principes agronomiques
Variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie		Insertion d'un gène étranger de la résistance à la rhizomanie dans le génome d'une betterave
Amélioration variétale classique		Utilisation de variétés tolérantes au BNYVV dont la résistance provient de betteraves sauvages ----- Utilisation de variétés résistantes au vecteur, <i>P. betae</i>
Lutte chimique :		Désinfection du sol par fumigation
Lutte biologique	Agents antagonistes	Champignons parasites des spores de <i>P. betae</i>
	Culture-piège	Utilisation de plantes plus attractives que les betteraves sucrières pour <i>P. betae</i>
	Protection croisée	Infecter les betteraves avec un virus protecteur proche de BNYVV
	Résistance systémique induite	Activer des mécanismes de défenses naturellement présents dans la plante mais latents
	Mesures ayant un impact sur la microflore du sol	Adaptation des pratiques culturales : pH, Irrigation
Lutte intégrée		Gestion intégrée (variétés tolérantes+ adaptation des pratiques culturales)
Innovation institutionnelle		Recommandations de l'IRBAB sur le choix des variétés Inscription de nouvelles variétés uniquement tolérantes à partir de 2005

### 3.4. Liens entre innovations et filière

#### 3.4.1. Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovation

##### a. Génie génétique

- **Facteurs techniques**

Les facteurs techniques positifs du génie génétique comme les mécanismes de résistance différente et supérieure, les nouvelles sources de résistance, la possibilité d'avoir une résistance à plusieurs maladies ainsi que les obstacles techniques comme un dépassement de cette résistance sont présentés au paragraphe 3.4.2.a

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Les plantes transgéniques étant au centre d'une controverse importante, les facteurs de développement socio-économiques influencent cette innovation. Ces points seront traités plus en détails dans les paragraphes 3.4.2.b **Aspects sanitaires et environnementaux** et 3.4.2.c **Aspects socio-économiques**.

##### b. Amélioration végétale classique

- **Facteurs techniques**

Les espèces de betteraves sauvages telles que *Beta procumbens* et *B. patellaris* présentent une résistance assez forte envers *Polymyxa betae* (Rush, 2003). Des efforts doivent être faits pour améliorer d'un point de vue agronomique les variétés présentant cette résistance à *P. betae*. Une certaine résistance à BNYVV a aussi été décelée dans les espèces sauvages *Beta vulgaris ssp. Maritima*, *Beta corolliflora*, *Beta intermedia* et *Beta lomatomogona* (Buttner et al., 1995; Paul et al., 1993). Actuellement, les mécanismes de résistance employés se basent seulement sur le gène *Holly* et l'ARN des virus des plantes ayant une grande capacité à muter, on peut craindre un dépassement des mécanismes de résistance (Rush, 2003). C'est la raison pour laquelle, il faut trouver d'autres mécanismes de résistance et que des recherches sont réalisées afin d'améliorer d'un point de vue agronomique les variétés résistantes qui proviennent d'espèces sauvages.

- **Facteurs de développement socio-économiques**

L'IRBAB a un rôle important dans le changement des mentalités par rapport aux variétés tolérantes. Le fait de les recommander favorise l'adoption de cette innovation.

##### c. Lutte chimique

- **Facteurs techniques**

La fumigation du sol peut réduire l'inoculum de spores virosées par BNYVV et également les autres pathogènes du sol. Cette technique réduit la sévérité et l'incidence de la rhizomanie et augmente le rendement. Si plusieurs pathogènes dont des nématodes sont présents sur une parcelle, la fumigation peut être intéressante vu qu'aucun cultivar présente actuellement une résistance génétique adéquate à des divers pathogènes (Rush, 2003).

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Le coût de la lutte chimique peut être prohibitif ainsi que son impact sur l'environnement. Quoique techniquement actifs, ces produits sont inutilisables en pratique en culture de betterave (Decoin M. 1997).

**d. Lutte biologique**

- **Facteurs techniques**

L'efficacité de ces méthodes est faible.

Agents antagonistes : L'action de *Trichoderma sp* est beaucoup trop faible pour être réellement efficace contre *P.betae* (Decoin M., 1997).

Protection croisée : La température optimale du virus BSBMV étant inférieure à celle du virus de la rhizomanie (BNYVV), il a été suggéré qu'une infection précoce par BSBMV au champ puisse réduire l'incidence et la sévérité de la rhizomanie. Cependant, les effets de BSBMV sur la production des betteraves sucrières ne sont pas encore totalement connus (Wisler et al., 1994). De plus, lorsque les plantes sont exposées simultanément au BNYVV et au BSBMV, ce n'est pas toujours BSBMV qui prédomine (Wisler et al., 1994). Dans des conditions d'infection naturelle, les deux virus peuvent infecter la plante en même temps. Dans ce cas, le virus possédant la plus grande densité d'inoculum prédomine et colonise la majorité du système racinaire (Rush, 2003).

Cultures-piège : pas info

Résistance induite : Il est plus difficile de travailler avec ce genre de méthode, lors d'infections virales. En effet, une fois introduit dans la plante, le virus détourne le métabolisme de celle-ci à son avantage.

Mesures ayant un impact sur la microflore du sol : L'addition de sulfure afin de réduire l'infection racinaire par *P. betae*, entraîne également des effets adverses pour le développement de la betterave. En effet, cette addition diminue le pH du sol en dessous de 5,5 et le pH optimum de la betterave sucrière se situant aux alentours de 7-7,5. Or, une acidité de sol inférieure à pH 6,5 est nuisible à cette culture.

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Les sources bibliographiques sur la lutte biologique sont rares et le niveau de connaissances de cette méthode de contrôle est plutôt faible. De plus, l'efficacité de ces méthodes est discutée et elles sont difficilement applicables contre la rhizomanie. La recherche pour la lutte biologique ne fait pas partie des habitudes des principales firmes phytosanitaires.

**e. Lutte intégrée**

La lutte intégrée offre une solution efficace et durable contre la rhizomanie. En effet, si on complète l'utilisation des variétés tolérantes à la lutte intégrée, on diminue la pression de sélection et donc on ralentit l'apparition de résistances. La combinaison des stratégies visant à gérer le potentiel infectieux pour essayer de le maintenir faible ou de le stabiliser avec des variétés tolérantes augmente l'efficacité des variétés tolérantes contre la rhizomanie. Toutefois, cela demande de changer sa façon de faire et demandent une charge de travail plus importante.

**f. Innovation institutionnelle**

La liste de variétés recommandée (encadré 2) sert à faire évoluer le choix vers de meilleures performances ou des facteurs agronomiques plus intéressants (Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave, IRBAB, 2005). Les variétés de la liste ont été évaluées pendant trois années sur divers critères (rendement moyen, variabilité entre champs/années, tolérance, etc.).

Cette liste présente l'avantage de réduire le nombre de variétés utilisées. En effet, la liste contient 17 variétés au lieu de 60 variétés qui sont inscrites et proposées par les semenciers. Sans cette liste, le choix de variétés aurait été ingérable par l'interprofession et par les vendeurs de graines eux-mêmes. De plus, le contrôle de toutes les semences aurait engendré des coûts inutiles pour le secteur betterave-sucre en Belgique (Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave, IRBAB, 2005).

L'ensemble de la liste garantit une diversité de choix. Mais, on peut poser l'hypothèse qu'un nombre plus réduit de variétés tolérantes à la rhizomanie utilisées diminue la diversité génétique et peut accélérer le dépassement de cette résistance par le virus.

**g. Synthèse des avantages et inconvénients ainsi que des facteurs de développement des innovations**

**Tableau 22 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement du Génie génétique, betteraves transgéniques résistantes à la rhizomanie.**

Génie génétique, betteraves transgéniques	Avantages et inconvénients							
	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
		Agr	Su	P.pub	Cons	Firm		
Résistance plus forte qu'avec les variétés tolérantes actuelles, réduction du virus dans la racine, donc moins de problèmes du à la rhizomanie	+, ?	+ ?	+ ?					
Solution en cas de dépassement de la résistance des variétés tolérantes (gène Holly)	+							
Durabilité de la résistance, car plusieurs mécanismes et gènes (actuellement 1 gène, Holly)	+, ?							
Sources et mécanismes de résistances différentes	+							
Pression de sélection sur le virus, risque de dépassement de la résistance	-, ?							
Résistance à plusieurs maladies	+	+						
Performance variétale supérieure, intérêt non prouvé par rapport aux variétés actuelles	+, ?	+, ?	+, ?					
Utilisation plus facile et plus rapide de la source de résistance par transgénèse	?!							
Développement non terminé, nécessité d'encore de la recherche appliqué	-					-		
Prix des semences plus élevé		?						
Si séparation de la filière :	-	-	-	-		-		
⇒ Co-existence des différents types d'agricultures : risque de contamination		-	?	-	?		- ?	- ?
⇒ Problème de traçabilité et de transparence : coût, charge de travail		-	-	-				
Si non-séparation, perte du marché du sucre et dérivés comme le chocolat traditionnel, perte de la liberté du consommateur			-		-		?	
Impact sur la compétitivité de l'agriculture nationale (coût, perte du marché traditionnel)		?	?	?	?	?		
Impact sur l'autonomie et la liberté des agriculteurs à choisir		-, ?						
Impact sur la rentabilité et la structure socio-économique de la chaîne alimentaire				?				
Impact sur les orientations de recherche :								
⇒ Plus grand intérêt pour le génie génétique, donc plus d'argent et d'emplois				?		+		
⇒ Possibilité d'un intérêt plus faible pour l'amélioration classique et donc moins d'argent et d'emplois						-		
⇒ Impacts sur la disponibilité des méthodes de lutttes actuelles (variétés tolérantes)		- ?				- ?		
Impact sur l'emploi en agriculture, sur la chaîne alimentaire, en recherche, dans les firmes		?	?	?	?	?		
Risque pour la biodiversité (flux de gènes, faible car betteraves récoltées avant leur floraison)							- ?	
Impact sur la diversité des cultures et des variétés							- ?	
Effets non-attendus sur l'environnement				?			?	
Impact sur la sécurité alimentaire, sur la santé en générale				-				?
Facteurs de développement								
	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
Importants investissements des firmes qui devront rentabiliser leurs activités dans le développement		+	+					
Engagements de semenciers à ne pas vendre des betteraves transgéniques								-
Cadre réglementaire incertain et contraignant								-
Craintes du public, opposition des consommateurs							-	

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; agr=agriculteur; Suc=sucrierie; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme d'intrants, de semences, recherche...

**Tableau 23 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de l'amélioration classique**

Amélioration variétale classique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
			Agr	Suc	P.pub	Cons	Firm		
	Niveau agronomique (rendement, taux sucre, levée,...) comparable aux variétés non-tolérantes en champs sains	+	+	+					
Performance supérieure par rapport aux variétés non-tolérantes en champ contaminé	+	+	+						
Résistance également à la cercosporiose et à la ramulariose	+	+							
Teneur en BNYVV plus faible	+								
Propagation de la maladie plus lent (?)	- ?!								
Résistance assez forte au vecteur provenant d'espèces de betteraves sauvages	+								
Double résistance au virus et au vecteur : plus efficace	+								
Solution en cas de dépassement de la résistance des variétés tolérantes actuelles (gène Holly)	+	+	+						
Gène faiblement corrélé aux gènes d'intérêts agronomiques	-								
Sensibilité à l'oïdium	-								
Dépassement potentiel de la résistance : pression de sélection	- ?								
Couverture du sol plus faible	-								
Vigueur à la levée plus faible pour certaines variétés	- ?!								
Gamme réduite de variétés riche en sucre		- ?!	- ?!						
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+	+			
Facteurs de développement		Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
L'histoire de la sélection : les premières variétés tolérantes moins performante en champs sains que les variétés non-tolérantes								- ?	
IRBAB conseille actuellement les variétés tolérantes				+					

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; agr=agriculteur; Suc=sucrerie; P.pub= pouvoir public ; cons=consommateur, public ; firm= firmes+recherche...

**Tableau 24 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de la lutte chimique**

Lutte chimique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
			Agr	Sucr	P.pub	Cons	Firme		
	Diminue de manière drastique l'incidence et la sévérité de la maladie	+							
Coût très élevé		-							
Inutilisable en pratique en culture de betterave	-	-							
Impacts négatifs sur l'environnement							-	-, ?	
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+	+	+	+	+			
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants				
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
D'autres solutions mécaniques, plus accessibles (moins coûteuse), sont efficaces						-	-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur; Suc=sucrerie; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firm= firme+recherche...

**Tableau 25 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de la lutte biologique**

Lutte biologique	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
			Agr	Sucr	P.pub	Cons	Firme		
	Potentiel théorique de réduction du risque de la tavelure	+, ?							
Efficacité faible	-								
Stratégies différentes									
Difficulté d'application à grande échelle	-								
Nécessité de recherches supplémentaires						-			
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques	+	+	+	+	+	+			
Facteurs de développement dans le futur	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants				
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
Difficultés des procédures d'autorisations des agents de contrôle biologique								-	
Intérêt plus faible des firmes privées pour les composés naturels difficilement brevetables						-			
Méthode très peu utilisé et inhabituelle en agriculture							-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur; Suc=sucrerie; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme+recherche...

**Tableau 26 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de la lutte intégrée**

Lutte intégrée	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
			Agr	Suc	P.pub	Cons	Firme		
	Durabilité : diminue la pression de sélection	+							
Autre gestion, penser plus loin		-							
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques	+	+	+	+		+			
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants				
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
Pas d'infos à ce sujet									

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur; Suc=sucrierie; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme+recherche...

**Tableau 27 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de l'innovation institutionnelle**

Innovation institutionnelle	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé
			Agr	Suc	P.pub	Cons	Firme		
	Publicité sur les résultats des recherches		+	+			+		
Meilleure gestion des variétés	+								
Réduction du nombre de variétés	?								
Ne modifie pas profondément la filière comme dans le cas des plantes transgéniques	+	+	+	+					
Facteurs de développement	Facteurs stimulants				Facteurs handicapants				
	Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
Pas d'infos à ce sujet									

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé Tech=technologique et technique ; Agr=agriculteur; Suc=sucrierie; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme+recherche...

### **3.4.2. Avantage, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques**

La littérature concernant les variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie étant peu nombreuse et encore fort générale, de nombreuses incertitudes entourant cette innovation restent présentes et rendent l'évaluation de la pertinence de la betterave transgénique résistante à la rhizomanie difficile. Les obstacles au betterave transgénique ne sont pas que d'ordre technique. Nous allons distinguer les aspects agronomiques, les aspects sanitaires et environnementaux ainsi que les aspects socio-économiques traitant les enjeux des filières, les aspects législatifs et financiers.

#### **a. Aspects agronomiques**

- **Avantages des betteraves transgéniques**

- Impacts sur la résistance

Les variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie pourraient induire une résistance plus forte des betteraves face à la maladie. Elle pourrait aussi jouer un rôle intéressant en cas de dépassement de la résistance partielle des variétés tolérantes par le virus (Syngenta., 2005; Tuveesson S., 2005).

La présence de BNYVV dans les betteraves transgéniques résistantes à la rhizomanie serait moindre que dans les betteraves tolérantes. Le taux de virus dans les betteraves transgéniques avec expression de la protéine de capsid de BNYVV est réduit et le taux de multiplication du virus y est moindre que dans des betteraves normales (Mannerlof et al., 1996). Ces variétés pourraient donc diminuer la propagation de la maladie et le développement de son potentiel infectieux.

- Impact sur la performance variétale

Les variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie ont également un impact sur les performances des betteraves. Le rendement des variétés transgéniques serait supérieur à celui des variétés tolérantes notamment via l'introgression de la caractéristique génétique dans un très bon background génétique (Syngenta, 2004; Tuveesson S., 2005).

- Résistance à de multiples maladies

Un avantage qui pourrait découler de l'utilisation de variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie est la possibilité d'avoir une résistance à plusieurs maladies comme des variétés avec une double résistance rhizomanie-rhizoctone, voire même une triple résistance rhizomanie-rhizoctone-cercosporiose, par exemple. Obtenir des variétés à double ou triple résistance avec des performances de haut niveau pourrait être plus facile et plus rapide avec le génie génétique qu'avec des variétés tolérantes issues de la sélection classique.

- Les pratiques culturales inchangées

Contrairement à d'autres types de betteraves transgéniques telles que les betteraves Round up Ready, l'utilisation de variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie ne changerait en rien les pratiques culturales betteravières.

- Méthode de construction transgénique

La transgénèse<sup>46</sup> est plus rapide dans le sens où on utilise des gènes qui pourraient être transmis par la sélection classique mais qui nécessiteraient un temps long pour les identifier et les faire fonctionner de manière optimale. L'intérêt des variétés transgéniques provient d'une utilisation plus facile et plus

---

<sup>46</sup> Transgénèse : Insertion d'un gène étranger dans le patrimoine génétique d'un individu.

rapide de la source de résistance. En effet, grâce à la transgénèse, des gènes provenant d'autres espèces et qui ne sont donc pas transmissibles de manière naturelle, pourraient être introduit dans les variétés transgéniques. A plus long terme, en insérant un gène de résistance au vecteur (*P. betae*) dans une variété transgénique résistante au virus (BNYVV), on pourrait imaginer une double résistance contre le virus et contre son vecteur.

- **Les inconvénients techniques**

- Impact sur la résistance

Des analyses et des tests restent encore nécessaires pour confirmer la supériorité de la résistance à la rhizomanie des plantes transgéniques. En effet, aucun document n'a encore été publié sur la supériorité de la résistance à la rhizomanie des variétés transgéniques. Cette résistance ne serait pas identique pour toutes les variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie. Elle dépendra des firmes semencières, les variétés utilisées pour l'insertion du gène, les méthodes de fabrication et les mécanismes de résistance de ces plantes.

La réduction de la multiplication du virus dans les variétés transgéniques n'aurait pas que des effets positifs. En effet, cette réduction induit une pression de sélection sur le virus qui pourrait entraîner la mutation de celui-ci. Comme pour les variétés tolérantes à la rhizomanie, un dépassement de la résistance des variétés transgéniques n'est pas à exclure. Mais, il semblerait que cela soit moins probable (Tuvevsson S., 2005). La résistance par transgénèse semble plus durable notamment parce qu'elle ne se base pas sur un seul gène comme actuellement avec les variétés classiques (gène Holly) et parce qu'elle se base sur plusieurs mécanismes de résistance.

- Impact sur la performance variétale

L'insertion de la caractéristique génétique donnant un bon rendement n'est pas aussi évidente dans toutes les variétés de betteraves proposées. Il est en effet plus facile d'insérer cette caractéristique dans certains génotypes que dans d'autres. L'impact qu'auront ces variétés transgéniques sur le rendement est difficile à prévoir. Tous ne sont pas convaincus de la supériorité des variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie, notamment les sélectionneurs de betteraves issues de la sélection classique.

- Méthode de construction transgénique

Le temps nécessaire à la création et au développement de variétés transgéniques résistantes à la rhizomanie n'est pas beaucoup plus court que celui nécessaire aux variétés tolérantes. Après avoir inséré le gène, une sélection classique doit encore avoir lieu.

## **b. Aspects sanitaires et environnementaux**

En théorie, la betterave sucrière présente un risque moyen à élevé de pollinisation croisée de plante à plante et de plante à betteraves sauvages ou mauvaises herbes. La pollinisation de la betterave sucrière s'effectue avant tout par le vent. Les pollens peuvent se disperser sur plus d'un km sous certaines conditions climatiques (Janssens L., 2003). En pratique, la betterave est récoltée avant la floraison, ce qui diminue le risque de pollinisation croisée

## **c. Aspects socio-économiques**

- Séparation des filières et coexistence des cultures

Chaque pays devra définir ses propres règles de co-existence des trois types d'agriculture biologique, traditionnelle et transgénique, fixer les responsabilités des utilisateurs et savoir qui paiera en cas de

contamination d'un champ biologique par des betteraves transgéniques. L'agriculteur qui cultivera des variétés transgéniques devra être très prudent et remplir beaucoup de formulaires afin de décrire ce qu'il fait et de garantir qu'il le fait correctement. Ce surplus de travail pourrait en décourager plus d'un. L'utilisation de zones d'isolation, de rangées de plantes servant de barrière et d'autres barrières végétales entre les cultures afin d'empêcher la dissémination du pollen représente un coût.

De plus, afin d'assurer un approvisionnement en sucre traditionnel et en sucre issu de betteraves transgéniques, la ségrégation de la filière betteraves-sucre serait indispensable mais entraînerait des coûts supplémentaires pour le secteur de la production sucrière. La ségrégation de la filière classique et transgénique demandera une traçabilité efficace, une gestion des parcelles traditionnelles ou transgéniques, un décalage temporel de la date d'arrachage et une sucrerie responsable uniquement de la transformation des betteraves transgéniques. Dans ce cas, la quantité de ces betteraves devrait déjà être assez importante pour faire tourner l'usine durant toute la campagne. Des zones de refuges devront également être installées et des étiquetages devront être effectués. Selon J.-F. Sneessens, secrétaire général à la CBB<sup>47</sup>, l'existence de deux filières différentes est impossible car le coût serait prohibitif. Mais, dans le cas de la non-séparation de la filière, le sucre produit (qu'il provienne de betteraves traditionnelles ou transgéniques) devrait alors être étiqueté avec une mention stipulant qu'il contient des organismes génétiquement modifiés. Entraînant la perte du créneau du sucre traditionnel, cette situation serait défavorable aux sucriers.

- Aspects législatifs liés à l'utilisation de betteraves transgéniques résistantes à la rhizomanie

Le cadre réglementaire<sup>48</sup> régulant les autorisations de dissémination d'OGM étant jugé incertain et contraignant par les notifiants, aucune demande n'a encore été délivrée pour l'année 2004 (Belgian Biosafety Server, 2004). Il en résulte qu'aucune betterave transgénique n'est actuellement cultivée en Belgique.

---

<sup>47</sup> CBB : Confédération des betteraviers belges

<sup>48</sup> En ce qui concerne la commercialisation des plantes transgéniques, un moratoire a été adopté en 1999 par six états membres (Italie, France, Grèce; Danemark, Luxembourg, Autriche) et rejoint en 2001 par trois autres pays (Allemagne, Portugal et la Belgique). Deux nouvelles réglementations européennes relatives à l'étiquetage et à la traçabilité d'organismes génétiquement modifiés (OGM) destinés à l'alimentation humaine ou animale sont pleinement entrées en vigueur au mois d'avril 2004. Cela a levé le moratoire sur l'importation des OGM. Cette levée ne signifie cependant pas que la culture de betterave transgénique est désormais autorisée en Belgique. Des demandes devront être introduites auprès de la SBB et des études, au cas par cas, devront être réalisées avant d'accorder toute autorisation de mise en culture.

## 4. Evaluation systémique de la pertinence des pommiers transgéniques résistants à la tavelure<sup>49</sup>

---

**Résumé** - La tavelure du pommier causée par le champignon *Venturia inaequalis* affecte l'aspect extérieur des fruits, les rendant invendables. La tavelure est le problème technique numéro un dans les vergers. La monoculture et l'utilisation majoritaire de quelques variétés, sélectionnées depuis les années trente sur des caractères divergents de ceux liés à la résistance aux maladies ont favorisé le développement de *V. inaequalis*.

Actuellement, pour éviter les infections, en agriculture conventionnelle, les producteurs pulvérisent le verger dix à quinze fois et jusqu'à une vingtaine de fois par an à l'aide de fongicides de synthèse de février à fin juillet. Les traitements ont lieu, en général, en fonction des systèmes d'avertissement. Ces pulvérisations représentent une charge de travail et un coût important. De même, cela a impact négatif sur l'environnement et sur la santé humaine. Par ailleurs, ce travail est source de stress pour le producteur qui a peur de voir une grande partie de sa production perdue à cause de la tavelure, faute d'avoir manqué un traitement. On pourrait diminuer drastiquement le nombre de pulvérisation en utilisant d'autres variétés qui sont plus résistantes à la tavelure. Les variétés résistantes sont obtenues à partir d'une variété sauvage (*Malus floribundia*), possédant un gène de résistance à la tavelure, le gène « Vf », croisée plusieurs fois avec des variétés de meilleure qualité gustative et visuelle pour tenter d'obtenir des variétés commercialisables. Mais celles-ci ayant un succès commercial faible, elles ne sont pas plantées. Les variétés résistantes à la tavelure doivent se tailler une place parmi d'autres variétés dont la renommée est déjà établie. Or, cette gamme est très réduite. C'est le fonctionnement propre des principaux des criées qui favorise le succès d'un nombre restreint de variétés.

A moyen terme, les variétés « Vf » pourraient intéresser et enrôler les acteurs du secteur fruitier. En effet, de nombreux éléments viennent, ou vont venir, renforcer le développement de ces variétés comme l'écologisation des politiques nationales de certains gouvernements, l'interdiction d'un nombre croissant de pesticides par les autorités européennes. De même, la sensibilisation croissante des consommateurs aux problèmes de l'agriculture industrielle chimique, le progrès dans les programmes d'amélioration, qui produisent des variétés résistantes de qualité toujours meilleure et la naissance de structures commerciales faisant la promotion de ces variétés vont également favoriser ces variétés.

A long terme, si les variétés résistantes obtenues par croisement classique n'arrivent pas à percer le marché, les pommiers transgéniques résistants à la tavelure y parviendront peut-être. Ceux-ci sont obtenus par l'insertion d'un gène responsable de la production d'hordothionine (une protéine antimicrobienne qu'ils ont découvert dans l'orge) au sein du génome de pommiers qui ont déjà un succès commercial comme les variétés Elstar, Gala et Santana. Ces pommiers transgéniques résistants à la tavelure ne sont pas techniquement prêts, ils sont seulement au stade de la recherche. A long terme, parallèlement avec l'apparition et le développement des pommiers transgéniques, les méthodes de lutte agro-écologiques comme les fongicides organiques (extrait de plantes), les champignons antagonistes, les agents éliciteurs de résistance systémique induite contre la tavelure se développeront également. De même, le verger sera peut-être complètement modifié afin de diminuer le développement de la tavelure (taille des parcelles moindre, meilleur espacement entre les lignes et entre les arbres, haies interlignes, vergers polyvariétaux, vergers polyfruitiers et des prés-vergers hautes-tiges).

---

<sup>49</sup> Cette étude de cas se base essentiellement sur le travail original de Gaëtan Vanloqueren.

## 4.1. La problématique : la tavelure en arboriculture

### 4.1.1. Description du problème :

#### a. La culture

En Belgique, en 2004, on comptait 16.500 hectares de vergers cultivés par 2.000 producteurs. La majorité de ceux-ci concernent les pommes (8.300 hectares) et les poires (7.000 hectares). De 2000 à 2004, on observe une diminution de 1.000 hectares de pommiers à l'avantage des poiriers (Institut National de Statistiques 2005). Dans les vergers professionnels, l'objectif est la production de « pommes-couteau », c'est-à-dire la pomme à croquer ou encore pomme de table. L'industrie de transformation (jus, compote), quand elle n'a pas délocalisé ses activités, utilise les pommes de rebut, c'est à dire les fruits tombés au sol ou mal calibrés. La filière fruitière est très différente des grandes cultures comme la betterave sucrière ou le maïs, car le contact avec le produit et le consommateur est direct. Par-là, la qualité extérieure du fruit est primordiale. La pomme doit en aucun cas comporter la moindre tache.

Aux problèmes phytosanitaires et techniques s'ajoutent une surproduction structurelle et un effondrement des prix au début des années nonante. C'est donc dans un contexte de crise quasi-structurelle (surproduction, prix bas, fin de la période de gloire de la Jonagold) qui dure depuis une dizaine d'années que les producteurs doivent aujourd'hui faire le choix des variétés qu'ils plantent. En effet, les arbres sont arrachés et remplacés après 12-15 ans lorsque leur rendement commence à diminuer ou que la coloration des fruits ne se fait plus idéalement (Magein H., 2002).

#### b. La filière de l'arboriculture de pomme

Le choix variétal est un point crucial de la filière. Le secteur est dans l'attente de « La variété ». Les acteurs principaux orientant l'innovation variétale sont (Figure 6):

- Les **producteurs** ou **arboriculteurs** choisissent les variétés à planter dans leurs vergers tous les 12 à 15 ans. Ce choix difficile se base sur divers critères techniques comme la date de récolte, la coloration, le goût mais principalement sur les résultats commerciaux, actuels et attendus des différentes variétés.
- Les **structures d'encadrement** du secteur comme les jardins d'essais conseillent les producteurs sur les variétés les plus adaptées
- Les **pépiniéristes** créent et multiplient les variétés.
- Les **centres de recherches** participent à la création de nouvelles variétés et font des études sur les anciennes variétés.
- Les **criées** sont des organisations de producteurs organisées sous forme de coopératives. Ils achètent, stockent et vendent (à l'exportation et aux grandes surfaces) dans des gigantesques plates-formes. La toute grande majorité des pommes est vendue en Belgique et en Europe par leur intermédiaire. Soixante pourcent des pommes produites dans les vergers belges sont destinées à l'exportation et, pour celles qui seront consommées en Belgique, près de 70% seront achetées dans les grandes et moyennes surfaces (Sandrap, 2002). Les criées sont hyper-spécialisées et ne gèrent que quelques sortes de fruits (pommes et poires, par exemple) et que quelques variétés pour chaque fruit du moins en volumes (Jonagold, Golden, Elstar,...). Les criées belges doivent s'orienter sur le créneau de quelques variétés majoritaires vendues à la grande surface.
- Les **clubs** sont des organisations entre des obtenteur, des pépiniéristes, des producteurs et des sociétés de commercialisation. Ils ont comme objectif la promotion et la maîtrise, à chacun des stades de la variété qu'ils ont créées. Son administration est assurée par une structure rassemblant des obtenteurs et des pépiniéristes : ce sont eux qui décident du fonctionnement du club, qui varie de l'un à l'autre.

- Les **consommateurs** qui ont leur goût, leur exigence visuelle formatés à seulement quelques variétés de pommes. Ils n'ont le choix que dans la gamme qui leur est proposée par la grande surface. Les consommateurs, quand ils peuvent exprimer leurs préférences directement auprès du producteur, effectuent des choix beaucoup plus variés que ceux transmis par le biais de la grande distribution et des criées. Il y a en effet non pas un mais plusieurs consommateurs : les jeunes qui aiment des pommes plus croquantes, des vieux qui aiment des pommes plus molles, des amateurs de pommes sucrées ou plutôt acidulées,...

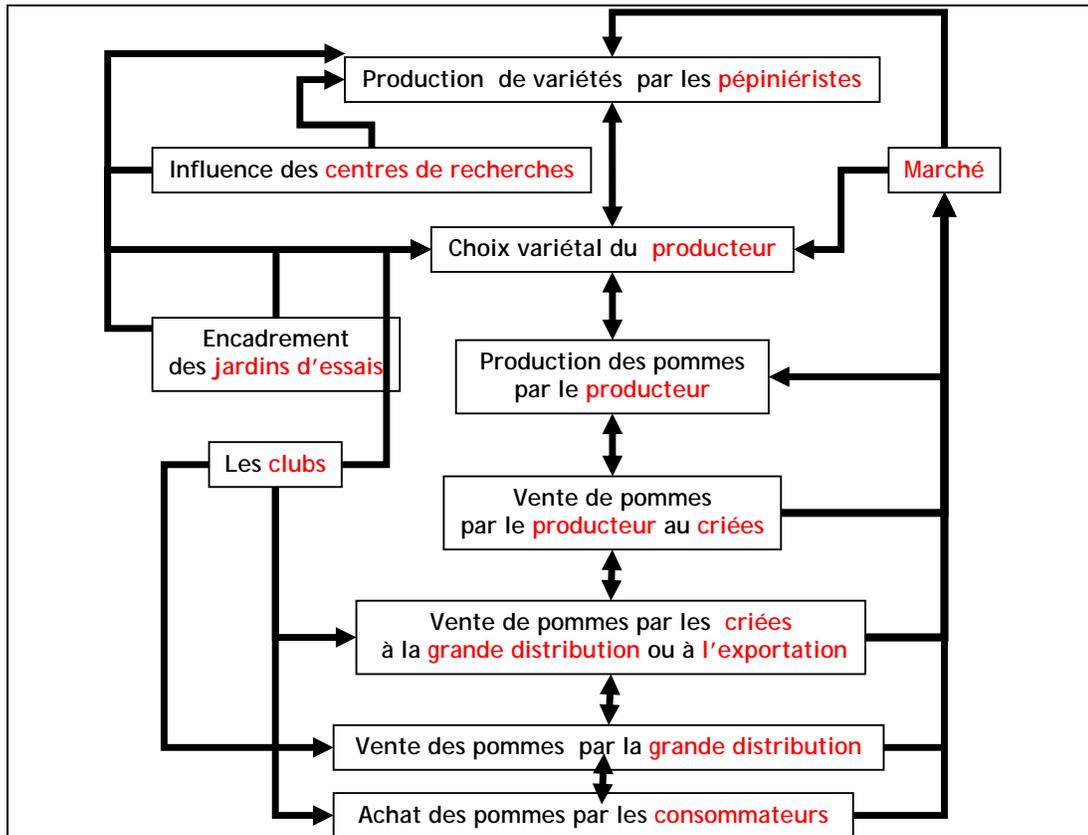


Figure 6 La filière de la pomme en Belgique

### c. Le problème technique : Tavelure (Figure 7)

La tavelure est une maladie fongique des pommiers et des poiriers. Cette maladie cryptogamique entraîne rapidement des taches et des lésions sur les feuilles et les fruits, rendant ceux-ci invendables. La maladie peut également encourager la chute prématurée des fruits, accélérer la chute des feuilles et affaiblir l'arbre, ce qui résulte éventuellement en moins de bourgeons à fruits (Proctor J.T. et al. 1983). Les pertes dues au développement de la tavelure sur le fruit peuvent atteindre 70%, ou même davantage, lorsqu'un temps froid et humide survient au cours des mois de printemps. Les fruits gravement infectés tombent souvent prématurément de l'arbre de sorte que la perte peut être totale. Les fruits légèrement infectés sont déclassés du frais à la transformation, ce qui entraîne une perte de valeur de 68 à 70 % (Division des renseignements de la Direction de l'industrie des produits végétaux 1993). La tavelure représente le problème technique numéro 1 dans les vergers.

L'organisme responsable de la tavelure du pommier, *Venturia inaequalis* a besoin de la pluie pour infecter les feuilles et se disperser (Encadré 3). La pluie étant caractéristique du climat belge, cette maladie y est fréquente.

### Encadré 3 : le cycle de vie de *Venturia inaequalis*

**Cycle de vie :** Le champignon hiverne sur les feuilles qui tombent des arbres infectés, sous la forme de périthèces. Au printemps, au moment de l'écllosion des bourgeons des pommiers, les périthèces se remplissent d'*ascospores*, qui sont éjectées lors de journées humides et atteignent les arbres grâce aux mouvements dans l'air du verger. Cette décharge d'ascospores dure jusqu'à fin juin. Lorsque les ascospores atteignent les feuilles et que celles-ci restent mouillées pendant un certain temps, ils germent et pénètrent les feuilles. C'est *l'infection primaire*, elle est visible en une à trois semaines, suite à l'apparition de taches foncées brunes sur les feuilles. Le champignon se développe durant le reste de l'été et engendre des *conidies*, une autre forme de structure reproductrice. Lorsque celles-ci s'échappent et sont dispersées par la pluie, elles peuvent infecter d'autres parties de l'arbre ou du verger. C'est *l'infection secondaire* (Duval J. 1992).

La propagation de la maladie peut se faire de façon local par les conidies et sur des grandes distances par des ascospores via le mouvement de l'air dans le verger. L'utilisation majoritairement d'une seule variété, bien adaptée au marché industriel: la *Golden* (années 60), puis la *Jonagold*<sup>50</sup>, a créé un environnement favorable au développement du champignon *V. inaequalis*, qui s'est progressivement adapté à la variété la plus plantée. La Jonagold est ainsi passée du classement « moyennement sensible » à la tavelure au début de sa commercialisation en Belgique à « très sensible » dans les années 90, au moment où cette variété et ses mutants étaient plantés sur plus de 75% des surfaces (Magein H., 2002).

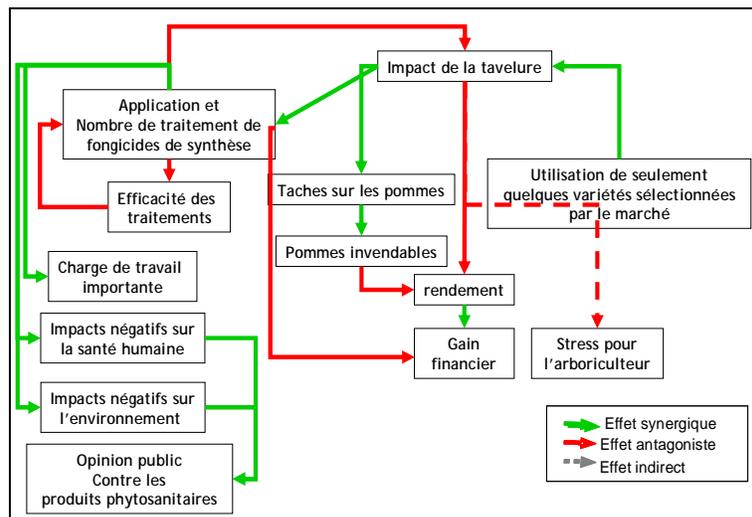


Figure 7 : Le problème de la tavelure en arboriculture

### La tavelure est le problème technique n°1 du verger

<sup>50</sup> Par ses qualités (qualités visuelles et gustatives, rendements élevés et réguliers, bonne conservation, calibres moyens à gros), la Jonagold, est ramené des Etats-Unis, par Jo Nicolai -un important pépiniériste belge, à la fin des années soixante. Si les vergers Golden sont reconvertis en Jonagold, de nouveaux vergers sont également créés. De 1988 à 1993, mille hectares de nouveaux vergers viennent chaque année s'ajouter (Sandrap, 2002). La Jonagold et ses mutants représentent alors 75% du verger belge (dans les années 1990). Cela engendre, au début des années nonante, une nouvelle surproduction structurelle et un effondrement des prix qui a été provoqué par une année de faible production due au gel, l'année 1991, ce qui a entraîné après plusieurs années de surplus par effet d'alternance.

#### 4.1.2. Implications (Figure 7)

##### a. Implications agricoles

En Belgique, la tavelure mobilise les énergies **des producteurs** plus que les autres problèmes du verger, qu'ils s'agissent des problèmes de pollinisation, de fumure, de désherbage ou des ravageurs (acarien, pucerons, insectes et mammifères). Dix à vingt traitements fongiques par an doivent être appliqués (Lespinasse et al., 1999) dans un laps de temps courts, en fonction d'alertes qu'ils reçoivent par le système d'avertissements de la station de recherche (de Gorseme) ou des craintes d'infection. Soit soixante à septante pour-cent des traitements appliqués au verger (Aalbers P., 1999), l'équivalent de quinze à quarante kilos de matière active par hectare et par an (Populer C. and Lateur M., 1993) sont nécessaire contre la tavelure.

Les fongicides représentent en effet un problème latent pour les arboriculteurs. En tant que produits phytosanitaires de synthèse appliqués intensivement, ils sont rejetés par les citoyens pour leurs risques sanitaires et environnementaux. Les précédents problèmes environnementaux ou alimentaires liés à l'utilisation de certains pesticides dans l'agriculture ont, comme chacun le sait, participé à créer une ambiance de méfiance auprès des **consommateurs**.

**Les organisations de producteurs (cristées)** comme les producteurs doivent être attentifs à cela. Toutefois, seule une faible proportion des **consommateurs** se soucie véritablement des conditions de production.

**Les pépiniéristes, les jardins d'essais, les centres de recherche** mobilisent leur énergie pour trouver des variétés résistantes à la tavelure et commercialisables.

##### b. Implications économiques

La tavelure est jusqu'à aujourd'hui un coût assuré uniquement par les **producteurs**. Les traitements phytosanitaires nécessaires contre la tavelure représentent un coût d'achats des produits et un coût de mains d'œuvre non négligeable. De même, les pertes de rendement et de qualité engendrées par la tavelure diminuent le chiffre d'affaires des producteurs.

Ces fongicides sont coûteux (coût des fongicides<sup>51</sup>, du carburant et de la mains d'œuvre pour les traitements) et doivent être renouvelés régulièrement afin d'éviter l'apparition de souches de tavelure résistantes aux fongicides.

En prenant comme référence arbitraire la quantité totale de matières actives appliquées en moyenne par an et par hectare, on constate que, parmi les principales cultures agricoles, l'arboriculture fruitière est la culture qui en utilise le plus. Sa moyenne est de 42 kg alors que les betteraves sucrières et le maïs utilisent respectivement 4,5kg et un peu moins de 2 kg en moyenne (Lateur, 2002).

##### c. Implications environnementales

Le principal effet reconnu des fongicides de synthèse est une toxicité pour la faune des milieux aquatiques. Cependant, seulement 5% des vergers belges seraient dans des situations pédogéographiques entraînant ces effets. Des mesures anti-dérives doivent être pris. Certains produits peuvent également avoir des effets négatifs sur la coccinelle. La matière active, le captane est suspectée d'avoir des effets négatifs sur l'environnement. D'autres fongicides utilisés contre la tavelure ainsi que le captane sont considérés comme dangereux pour l'environnement.

---

<sup>51</sup> Le captane à 80% pour un conditionnement de 5kg, coût 7€30 le kilo+TVA. Les produits systémique coût plus cher par exemple le prix de 1 litre de Geysler dont la matière active est le difenoconazole, est de 72€50+TVA (Brichart, 2005)

Les risques environnementaux des fongicides de synthèse seraient cependant limités, en comparaison de ceux des herbicides et des insecticides.

#### **d. Implications sur la santé humaine**

La tavelure est une source de stress pour les producteurs. L'application de fongicide présente un risque pour sa santé. Les résidus de produits phytosanitaires présentent également un risque pour le consommateur. Les risques pour l'alimentation seraient nuls dans la limite des résidus maximums autorisés sur le fruit. Ces doses autorisées de résidus sont régulièrement dépassées pour une partie non-négligeable des fruits et légumes en Europe comme l'attestent les études annuelles de la DG SANCO de la Commission Européenne (Direction Générale Santé et protection des Consommateurs: DG sanco, 2004). Les fongicides de synthèses sont suspectés d'être à la source de problèmes de santé humaine (Alavanja et al. 2003; Hour T.C. et al. 1998; PAN Belgique Pesticide Action Network Belgium. 2005). La recherche épidémiologique (sur les hommes) ne permet pas réellement de déterminer quel pesticide serait responsable de telle ou telle maladie (p.ex. des cancers) ou d'autres troubles observés chez les producteurs ou leurs familles<sup>52</sup>.

Un des fongicides les plus utilisés en Belgique, le captane, est suspecté d'une longue liste d'effets secondaires néfastes sur la santé humaine<sup>53</sup> (Pesticide Action Network). Il est, en effet, interdit en Allemagne, aux Etats-Unis, et en Egypte pour certaines cultures.

## **4.2. Stratégies de luttes actuelles**

On considère deux types de stratégies. Les stratégies « principales » sont celles qui sont « principalement » utilisées par les producteurs en agriculture conventionnelle, comme les fongicides de synthèse. Les stratégies « secondaires » sont celles qui sont très peu considérées dans la filière traditionnelle, comme les méthodes préventives, les fongicides minéraux...

### **4.2.1. Description des stratégies**

#### **a. Stratégies principales**

- **Fongicides de synthèse**

La plupart des fongicides contre la tavelure sont des fongicides de contact (ex. captane). D'autres produits sont systémiques<sup>54</sup> comme les produits à base de difenoconazole ou cyprodinil... Les substances actives utilisées contre la tavelure sont le captane, cyprodinil, difenoconazoles, manèbe, Zinèbe...ou font partie de la famille des strobilurines, familles des benzimidazoles (Fytoweb, 2005).

Les traitements contre les infections primaires sont réalisés du stade gonflement (février, stade pré-bouton rose) jusqu'à après la floraison (mi-juin, stade calice) et les traitements contre les infections secondaires sont contrôlées par des traitements allant jusqu'à fin juillet. Les traitements (10-20 traitements) sont réalisées généralement en fonction des avertissements tavelure (Système de prédiction selon les courbes de Mills). Les produits à action curative peuvent être appliqués endéans les 2 à 3 jours après l'infection, selon les avertissements.

---

<sup>52</sup> Les effets des interactions des différents produits entre eux et les effets à très long terme sont difficilement mesurables

<sup>53</sup> Il provoque de fréquentes intoxications et allergies chez les producteurs, est considéré ou suspecté par différentes études scientifiques d'être toxique pour les poissons et les larves d'abeilles, d'avoir de propriétés tératogènes et mutagènes envers différents animaux testés. L'Environmental Protection Agency et la CEE le classent comme cancérigène probable ou possible pour l'homme. L'Académie Nationale des Sciences (USA) considère le captane comme un des douze pesticides responsables de 98% des risques de cancer (Pesticide Action Network, non daté).

<sup>54</sup> Les fongicides systémiques sont mobiles dans la plante au contraire des fongicides de contact.

- **Système d'avertissements**

La méthode préventive qui se base sur les systèmes d'avertissements repose sur la prévision du risque d'infection et consiste à n'intervenir que lorsqu'il est atteint. Si on évite l'apparition des taches, la protection est arrêtée à la fin des projections d'ascospores, c'est-à-dire à la fin des contaminations primaires. La détermination des périodes d'infection nécessite d'intégrer les données climatiques telles que la durée d'humectation, la température, la pluviométrie et l'hygrométrie dans des tables ou dans les courbes de Mills (Giraud M. et al., 1996; Maraite H., 1998). Un réseau d'avertissements des risques d'infection est coordonné par la station météo de Gorseme qui est munie d'un logiciel contenant un modèle de prévision. Celui-ci indique les périodes d'infection par la tavelure et les périodes où les traitements sont nécessaires.

**Tableau 28 : Principe agronomique des stratégies principales contre la tavelure**

Stratégies principales	Principes agronomiques
Fongicides de synthèse	Anéantir ou réduire la germination des filaments de <i>V. inaequalis</i> dans les feuilles et fruits des pommiers par des produits chimiques
Pratiques intégrées (systèmes d'avertissements/pulvérisateurs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Prendre en compte les facteurs biologiques et les prévisions météorologiques pour ne traiter que quand c'est nécessaire</li> <li>○ Pulvérisateurs avec un système de récupération du liquide dégoulinant de l'arbre afin de diminuer la quantité total pulvérisée</li> </ul>

**b. Stratégies secondaires**

- **Méthodes préventives**

- Diminuer l'inoculum primaire

Le champignon hivernant sur les feuilles qui sont tombées des arbres infectés, le ramassage, le broyage et le brûlage de celles-ci en automne permettent de minimiser au maximum l'inoculum persistant dans le verger en hiver. Il est intéressant de favoriser la décomposition rapide des feuilles, en tondant après la chute des feuilles, en encourageant la vie microbienne dans le sol, par un ajout d'azote. L'utilisation de l'urée à 5% (ou de l'urine de vache ou d'humain) contre la tavelure est connue depuis près de vingt-cinq ans pour supprimer l'éjection d'ascospores (Gupta G.K., 1987).

Après la chute des feuilles, on peut mettre du compost sous les arbres et recouvrir le sol de paille, de foin ou d'herbes (Duval J., 1992). Il est préférable d'abattre les pommiers abandonnés dans les environs du verger afin de prévenir les sources extérieures d'infection.

- Résistance variétale classique

La sensibilité des pommiers à la maladie diffère d'une variété à l'autre. Dans les années 40, un pommier sauvage totalement résistant à la tavelure (*Malus floribundia*) a été découvert. Malheureusement, la taille minuscule des fruits de cette variété sauvage et leur mauvais goût rendent celle-ci non commercialisable. La résistance du pommier sauvage, *Malus floribundia* provient du gène de résistance à la tavelure, le gène « Vf »<sup>55</sup> (Crosby et al., 1992). Ce gène stoppe la sporulation de *V. inaequalis* (Chevalier M. et al., 1991). Par croisements classiques à partir de ce pommier sauvage possédant ce gène « Vf » et des variétés commerciales qui donnent la source des qualités nécessaires à

<sup>55</sup> « Vf » provient de « V » pour venturia, le champignon, « f » pour la variété qui lui était résistante : floribundia.

la réussite commerciale de toute nouvelle variété, on obtient des variétés résistantes avec des caractéristiques agronomiques intéressants.

Chacune des sept souches de *V. inaequalis* sont capables d'infecter plus ou moins certaines variétés. Ainsi, à côté de ces variétés résistantes ou sensibles, il existent des variétés tolérantes à la tavelure. La sensibilité à la maladie n'est en effet pas nulle ou totale mais graduelle.

- **Méthodes de lutte**
  - Fongicides minéraux

Les fongicides minéraux sont à base de soufre et de cuivre et ils sont souvent fortifiés avec de la chaux et plus récemment avec des poudres de roche, d'argile,... Les traitements ont lieu comme pour les fongicides de synthèse avant, pendant et après la floraison. Le **souffre** agit par vapeur, de façon préventive, en bloquant la respiration cellulaire et en inhibant la synthèse de l'acide nucléique et donc la germination des conidies. Son action est également partiellement curative (destruction du mycélium) et éradiquant (destruction des conidiophores) (ITAB and GRAB, 2002). Le **cuivre** est un produit de contact qui inhibe la germination des spores par une action multisite (au niveau des processus respiratoire, de la biosynthèse des protéines et de l'activité membranaire). La **bouillie bordelaise** est un mélange de sulfate de cuivre et de chaux hydratée. Ce produit combine le pouvoir fongicide du cuivre à la causticité de la chaux. La **bouillie sulfocalcique ou polysulfide de calcium** (lime-sulfure) est un mélange de chaux et de soufre mouillable. C'est le seul fongicide autorisé en agriculture biologique qui ait un certain pouvoir d'éradication. Elle est conseillée uniquement en cas de fortes infections incontrôlables par les autres méthodes au début de la floraison (ITAB and GRAB, 2002).

**Tableau 29 : Principe agronomique des stratégies secondaires contre la tavelure**

Stratégies secondaires	Principes agronomiques
Méthodes préventives <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ramassage des feuilles, broyage et application d'urée</li> </ul>	Pratique préventive qui permet de diminuer l'inoculum d'infection primaire
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Résistance variétale</li> </ul>	La maladie se développe presque pas chez certaines variétés, qui ont le gène de résistance à la tavelure, Vf
Méthodes de lutte <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fongicides minéraux</li> </ul>	Appliquer des solution de cuivre et de soufre pour anéantir ou réduire la germination des filaments de <i>V.inaequalis</i> dans les feuilles et fruits des pommiers

#### 4.2.2. Etats des lieux de l'utilisation des stratégies

Il existe en réalité trois modes de production en Belgique :

- L'arboriculture contrôlée (conventionnelle) qui produisent des variétés avec un grand succès commerciales mais sensibles à la tavelure (Golden, Jonagold et ses dérivées,..).
- L'arboriculture biologique ne représente que 6% de l'arboriculture en Wallonie<sup>56</sup>. (Bioforum Wallonie, 2005).
- L'arboriculture intégrée (ou raisonnée) « légale » couvre 67 % du verger belge. Toutefois, la production intégrée selon le cahier de charges Fruinet<sup>57</sup>, géré par le GAWI (Groupement des

<sup>56</sup> En Wallonie, en 2002, l'arboriculture fruitière de hautes et basses tiges de production biologique recouvrait 92,94ha sur 1.500ha de culture consacrée à la culture des fruits, soit 6%.

<sup>57</sup> Le cahier des charges de la marque Fruinet, géré par le GAWI (Groupement des Arboriculteurs pratiquant en Wallonie les techniques intégrées) est à l'origine de la production intégrée certifiée en Belgique. En 1996, un arrêté royal a cependant réglementé la production intégrée reconnue au niveau fédéral en s'inspirant du cahier Fruinet tout en y introduisant davantage de souplesse et moins d'exigences.

Arboriculteurs pratiquant en Wallonie les techniques intégrées) concerne seulement à peu près 15% des vergers belges, avec une présence nettement plus importante en Wallonie (67%) (GAWI 2001). Définie par un cahier de charges, la lutte intégrée favorise la régulation naturelle et limite au maximum l'utilisation de pesticides auxquels l'arboriculteur n'a recours qu'en cas de nécessité.

**Les fongicides de synthèse** (10-15 traitements fongicides) sont les principaux moyens de lutte dans la production conventionnelle et intégrée. Les pratiques intégrées se heurtent toujours au problème de la tavelure du pommier qui nécessite encore dix à quinze traitements par an.

**Les systèmes d'avertissements** sont presque toujours utilisés que ce soit en arboriculture intégrée, conventionnelle ou bio.

**Les techniques diminuant l'inoculum primaires, soit l'application automatales d'urée, soit le broyage des feuilles tombées** sont effectuées dans l'arboriculture biologique et intégrée (Lateur, 2002), mais très peu dans les vergers commerciaux conventionnels.

Les **variétés résistantes** peuvent être utilisées dans l'arboriculture intégrée mais le cahier des charges de Fruinet ne peut pas imposer leur utilisation, vue la non-acceptation des variétés résistantes actuelles par les marchés. Ces variétés sont plus plantées dans les vergers biologiques et principalement chez les producteurs réalisant une vente directe. La plupart des variétés résistantes ont été un échec commercial. L'utilisation réelle de ces variétés est **de plus ou moins 1%**.

Les **fongicides minéraux** sont utilisés uniquement en arboriculture biologique avec une fréquence égale ou supérieure aux fongicides de synthèse. L'utilisation des fongicide de synthèse y est, en effet, interdite.

**Tableau 30 : Synthèse de l'utilisation des stratégies**

Stratégies	Arboriculture conventionnelle	Arboriculture intégrée	Arboriculture biologique
Fongicides de synthèse	xxx	xxx	interdit
Système d'avertissement	xxx	xxx	?
Méthodes préventives	0	x	xxx
Résistance variétale	0	0	x
Fongicides minéraux	0	0	xxx

xxx : très fréquent ; xx : fréquent ; x : moyennement à peu fréquent ; 0 : rare ; ? : pas de données

#### **4.2.3. Avantages et inconvénients des différentes stratégies**

##### **a. Fongicides de synthèse**

Les fongicides de synthèse sont très efficaces contre la tavelure. Ils éliminent les dégâts causés par la tavelure à presque zéro. Cette méthode permet de planter des variétés très commerciales même si elles sont sensibles à la tavelure. Ils ont également une action sur d'autres maladies comme l'oïdium.

Toutefois, ils présentent le désavantage de devoir être appliqués 10 à 15 fois et jusqu'à 20 fois dans certains cas entre février et fin-juillet, en fonction des avertissements ou tous les sept à dix jours. Ceci représente un coût en produits<sup>58</sup>, en mains d'œuvre et en énergie fossile ainsi qu'une charge de travail importante. L'action uni-site des fongicides de synthèses nécessite la mise en place de stratégies anti-

<sup>58</sup>Le captane à 80% pour un conditionnement de 5kg a un coût de 7€30 le kilo+TVA. Les produits systémique coûtent plus cher par exemple le prix de 1 litre de Geysler dont la matière active est le difenoconazole, est de 72€50+TVA (Brichart, 2005)

résistance afin de réduire le risque d'apparition de nouvelles souches de tavelure résistantes à ces substances actives (Creemers P., 1998).

**Tableau 31 : Avantages et inconvénients des fongicides de synthèses**

Avantages	Inconvénients
Très efficace contre la tavelure	Nombreux traitements (10-20 passages) : Charge de travail et fuel importants
Action également sur l'oïdium	Quantité de produits important : coût des produits
Utilisé en agriculture conventionnelle depuis toujours	Uni-site donc problème de résistance (alterner et changer les produits)
Possibilité d'utiliser de variétés très commerciales et très sensibles à la tavelure	Impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine
	Mal vu par l'opinion publique

**b. Systèmes d'avertissement :**

Les systèmes d'avertissement tentent de diminuer le nombre de traitements. Cette diminution diminue le coût des traitements, la charge de travail pour le producteur. De plus, cela est bénéfique pour l'environnement.

Toutefois, dans la pratique, la diminution de la quantité de substances actives fongicides appliquée est faible dans les vergers des arboriculteurs qui suivent les systèmes d'avertissement (Anonyme, 1999) alors que les risques de dégâts causés par la tavelure menacent toujours les récoltes (Creemers P., 2000).

**Tableau 32: Avantages et inconvénients des systèmes d'avertissements**

Avantages	Inconvénients
Diminution du nombre de traitements :	Diminution faible de nombre de traitements dans certains cas.
Diminution de la charge de travail et du coût des traitements	Risque de dégâts plus importants qu'avec les méthodes conventionnelles

**c. Méthodes préventives diminuant l'inoculum primaire:**

Les méthodes préventives à savoir le ramassage, le broyage des feuilles, l'application d'urée sur celles-ci..., tentent de diminuer l'utilisation des fongicides de synthèse. En 1989 à Gorseme, le nombre de traitements a été réduit de treize traitements par assurance à neuf par le système d'avertissements (Maraite H. 1998).

La dernière enquête relative à l'usage des produits phytopharmaceutiques en arboriculture fruitière montre qu'en moyenne il n'y a pas de diminution significative de la quantité de substances actives avec les méthodes préventives (Lateur, 2002), alors que les risques de dégâts causés par la tavelure menacent toujours les récoltes (Creemers P., 2000).

**Tableau 33 : Avantages et inconvénients des méthodes préventives**

Avantages	Inconvénients
Méthodes diminuant l'inoculum primaire	Efficacité faible
Diminution de produits phytosanitaires Impact positif pour la biodiversité Impact positif pour l'environnement	Nécessité d'être en association à des méthodes de lutte
Approche différente, à l'échelle du système de l'exploitation : développement d'une agriculture durable	Main-d'œuvre Temps nécessaire
Effet positif sur l'érosion et la fertilisation (culture de couverture)	

**d. Résistance variétale**

La mise en culture de variétés nettement moins sensibles à la tavelure permettrait une réduction significative de l'usage des fongicides (Lateur, 2002). En France, une expérimentation conduite sur une période de cinq ans avec des variétés résistantes à la tavelure a montré qu'il est possible de réaliser une économie de plus de 70 % des traitements fongicides (Lateur, 2002)

Toutefois, les variétés résistantes nécessitent encore des traitements fongicides lors des pics d'infection. Dans le cas de cultures pérennes, l'introduction de nouvelles variétés dans le circuit commercial est lente et difficile à réaliser et les nouvelles variétés doivent répondre à un ensemble de critères agronomiques et économiques de plus en plus exigeant. En général, les variétés résistantes produisent des pommes qui se conservent peu de temps, ont un goût ordinaire et parfois pas bon et de dimensions ordinaires (Duval J., 1992).

**Tableau 34 : Avantages et inconvénients de la résistance variétale classique**

Avantages	Inconvénients
Efficace contre la tavelure :	Nécessité d'utiliser encore des produits phytosanitaires
Réduit de 70% les produits phytosanitaires Moins de travail, coût moindre Plus respectueux de l'environnement	Contournement partiel du mécanisme de résistance de « Vf » chez certaines souches de <i>V. inaequalis</i>
	Echec commercial
	Caractéristiques techniques mauvaises pour certaines variétés : la conservation, goût, aspects extérieurs

**e. Fongicides minéraux**

Les fongicides minéraux sont efficaces contre la tavelure et ils ont une action multisite. Ils ne sélectionnent donc pas des souches résistantes aux fongicides minéraux.

Le nombre de passages est plus ou moins identique à celui des fongicides de synthèse (10 à 20 passages). Les passages fréquents sont exigeants en main d'œuvre et en fuel. Le prix d'achats des fongicides minéraux semble assez similaire à celui des fongicides de synthèse, même si certains fongicides minéraux comme cuprex<sup>59</sup> sont meilleurs marchés. Ils engendrent des effets négatifs sur le

<sup>59</sup> Cuprex contenant 350gr de bouillie bordelaise a un coût pour un conditionnement de 5kg de 4,60€/kg et pour un conditionnement de 25Kg de 2,80€/kg+TVA (Brichart, 2005)

sol : l'accumulation du cuivre dans le sol, après un grand nombre d'années d'application nuit à l'activité biologique du sol. Le soufre quant à lui est acidifiant pour le sol (Duval J., 1992). Le soufre est phytotoxique pour les fruits et les feuilles surtout par temps chaud. Le cuivre est phytotoxique sur les organes humides et sous grand soleil. Le cuivre affecte les populations d'acariens (bons et mauvais). Le soufre s'avère nuisible pour certains insectes et acariens utiles tels que les punaises et acariens prédateurs et les hyménoptères parasites (Duval J., 1992).

**Tableau 35: Avantages et inconvénients des fongicides minéraux**

Avantages	Inconvénients
Efficace contre la tavelure	10-20 passages : passage plus fréquent qu'avec les fongicides de synthèse
Multisites : pas de problèmes de résistances	Phytotoxicité
Egalement efficace contre les acariens (+/-)	Coûteux produits+mains d'oeuvre
	Effets négatifs sur le sol
	Nuisibles pour certains insectes et acariens utiles

#### **4.2.4. Raisons de la non-utilisation des stratégies faiblement utilisées**

L'intérêt des fongicides chimiques explique en partie la faible utilisation des autres méthodes comme les méthodes préventives, les fongicides minéraux et les variétés résistantes. En effet, l'application de fongicides chimiques est actuellement une stratégie de lutte relativement efficace, malgré leur inconvénients (Tableau 31). Ils sont autorisés et les pouvoirs publics ainsi que des acteurs privés y ont investi depuis des années. Les fongicides de synthèse ne seraient en effet pas devenus et restés techniquement et économiquement concurrentiels pour les producteurs sans l'investissement privé des firmes, la création du réseau d'avertissement des risques d'infections et les tests de nouveaux produits par les jardins d'essais en collaboration avec les firmes.

##### **a. Méthodes préventives diminuant l'inoculum primaire**

Ces méthodes sont faiblement utilisées, essentiellement car le contrôle de la maladie repose principalement sur les traitements fongicides et car les méthodes préventives ne permettant que de diminuer l'inoculum primaire, elles ne garantissent pas une absence de maladie et elles présentent une efficacité trop faible pour être utilisées seules. Ces méthodes ancestrales ont été abandonnées avec l'apparition des fongicides de synthèse. De même, les arboriculteurs peuvent considérer ces méthodes vieillottes et inefficaces car elles sont anciennes. Toutefois, dans la pratique, les arboriculteurs qui font de la lutte intégrée sont abonnés à ces systèmes d'avertissement et appliquent en outre diverses techniques visant à réduire l'inoculum responsable des infections primaires.

##### **b. Résistance variétale**

Etant donné que la tavelure est le problème technique numéro un dans les vergers et que son traitement par les fongicides est coûteux et problématique, on aurait pu s'attendre à ce que la sensibilité des variétés de pommiers à la maladie, soit un critère important lors du choix variétal. Pourtant cet argument, comme d'autres critères techniques, est peu évoqué par les producteurs lorsqu'on les interroge sur les rénovations de leurs vergers.

Le problème de la tavelure est déconnecté du choix de la variété, notamment, par les désavantages techniques des variétés résistantes comme le goût, la couleur, la taille et la difficulté de conservation ainsi qu'en d'en avoir toute l'année et également par douze facteurs (techniques, socio-économiques et

historiques) qui expliquent également le faible niveau de développement des variétés résistantes non-transgéniques :

**Tableau 36 : Facteurs de non développement des variétés résistantes à la tavelure**

<b>Producteurs</b>	1) L'utilisation intensive de fongicides de synthèse est efficace. Les inconvénients de cette stratégie ne sont pas suffisants pour induire un changement. 2) Le renouvellement des vergers se concentre sur des variétés commerciales non-résistantes, moins risquées sur le plan commercial (ex : Jonagold)
<b>Conseil technique</b>	3) Peu de conseils positifs pour la plantation de variétés résistantes malgré des résultats techniques encourageants.
<b>Histoire de l'amélioration</b>	4) Longue période de sélection en défaveur de la résistance aux maladies ; réduction de la diversité de variétés plantées 5) Longue période de concentration des programmes de création de variétés résistantes sur la résistance monogénique (gène Vf)
<b>Marché</b> <i>Criées</i>  <i>Grande distribution</i>  <i>Clubs</i>	6) Les objectifs commerciaux et les contraintes imposées par la globalisation des marchés fruitiers incitent à la gestion de six ou sept variétés seulement (frein à la diversité) 7) Rationalisation des variétés vendues (6-7 variétés vendues toute l'année) d'où une difficulté de lancement de nouvelles variétés (masse critique,...) 8) Promotion de variétés très sensibles (Pink Lady) à grands renforts de marketing pour les clubs les plus connus.
<b>Consommateurs</b>	9) Goût formaté par quelques variétés présentes toute l'année 10) Faible connaissance des conditions de production et faible traduction des valeurs écologiques dans les actes d'achats
<b>Critères de qualité</b>	11) Ambiguïté sur l'adéquation des variétés résistantes par rapport aux critères de qualité (gustatifs, techniques, commerciaux) et certaines faiblesses techniques 12) Construction des critères de qualité par le marché lui-même et les quelques variétés commerciales à succès (Jonagold)

### c. Fongicides minéraux

Les inconvénients des fongicides minéraux ainsi que la promotion privée et l'utilisation massive des fongicides de synthèse expliquent leur faible utilisation.

## 4.3. Innovations

### 4.3.1. Description des innovations

#### a. Génie génétique

- **Variétés transgéniques résistantes à la tavelure**
  - Principe agronomique

Les pommiers transgéniques sont obtenus en insérant un gène de résistance dans le génome de variétés commerciales du pommier. La source de la résistance du pommier transgénique est un gène provenant de l'orge, codant pour l'hordothionine, une protéine naturellement produite dans cette céréale qui a des propriétés antifongiques (Plant Research International, 2001). Ce gène code pour des peptides anti-microbiens, plus connus sous l'appellation « AMP genes ». Cette appellation « AMP »

provient de « Anti-Microbial Peptides ». Le mécanisme précis de la résistance est inconnu des chercheurs. Plant Research international (PRI), institut de recherche hollandais privé mais sans but lucratif a introduit ce gène dans les variétés lui appartenant principalement Elstar et puis Gala.

Le Fruitteeltcentrum (FTC) de la KUL a envisagé la résistance à la tavelure de la même manière que par les chercheurs de Plant Research International, c'est-à-dire par le transfert, dans des variétés de pommiers commerciales renommées, de gènes AMP naturellement présents dans d'autres végétaux. Le FTC a pourtant encouru à un échec, en se tournant vers les gènes provenant de l'oignon ou du Pétunia.

- Etats de développement

La demande de champs d'essais en Belgique, qui suit un refus d'une précédente demande d'essais en Hollande, a été refusée par les autorités belges. PRI a alors réintroduit une demande en 2003 en Hollande, qui a été acceptée. Parallèlement, les chercheurs travaillent à une nouvelle construction transgénique ne recourant pas au gène de résistance à un antibiotique dont l'utilisation est controversée. Ce nouveau transgène est nommé « clean technology ». Avec le développement d'une « clean technology », ils espèrent améliorer les chances d'acceptation de leur technologie aux yeux du grand public.

Les pommiers transgéniques résistants à la tavelure étudiés ici ne sont pas techniquement prêts, ils sont seulement au stade de la recherche. L'Union Européenne prédit d'ailleurs le développement de telles plantes transgéniques, la « seconde vague » des OGM, pour 2007-2012 (European Science and Technology Observatory, 2003).

## **b. Amélioration variétale classique**

L'amélioration variétale classique bien que traitée dans la partie stratégie (4.2.1) peut également être considérée comme une innovation. Les variétés résistantes à la tavelure actuellement, sont pas ou peu acceptées par le marché. Des recherches ont encore lieu pour trouver d'autres variétés résistantes. La surproduction (en Belgique, en Europe et bientôt au niveau mondial) et les bas prix qu'elle entraîne, combinés avec la fin de la période de gloire de la Jonagold laissent le secteur dans une situation de grande incertitude. Celui-ci est en attente d'une nouvelle variété qui remplacera la Jonagold en ayant toutes ses qualités et davantage, c'est-à-dire lui ressembler, tout en s'en distinguant pour pouvoir la remplacer. L'objectif de l'innovation variétale est de créer ces variétés. La Jonagold est, en effet, la référence du secteur tout entier et de l'innovation variétale.

- **Variétés résistantes à la tavelure et commercialisées**

- Principe agronomique

De nombreux programmes d'amélioration à travers le monde travaillent à la création de variétés résistantes possédant un ensemble de critères agronomiques et économiques. Des recherches ont lieu pour améliorer les variétés possédant le gène « Vf ». L'amélioration ne se base toutefois pas uniquement sur la résistance monogénique. En effet, suite à l'adaptation de *V. inaequalis* aux variétés « Vf », d'autres programmes sont particulièrement orientés vers l'utilisation de la résistance polygénique (résistance basée sur plusieurs gènes sources de résistance) qui, potentiellement, est plus durable mais par contre n'offre qu'une résistance partielle (Lateur M. et al., 2000). Cette résistance polygénique est obtenue par l'intégration dans les programmes de croisement de nombreuses variétés (notamment paysannes) possédant diverses sources de résistance.

- Etats de développement

La première variété résistante à la tavelure, la variété Priam, a été diffusée dans le secteur professionnel dans les années 70. Comme presque toutes les autres variétés dites « Vf »<sup>60</sup> qui sont sorties après elle, la Priam fut un échec commercial. C'est seulement depuis quelques années que certaines variétés résistantes (Topaz, Initiale, ...) obtiennent un succès, encore restreint à une infime partie des plants vendus. En tout, 37 variétés « Vf » ont été créées et d'autres sont en cours de création (Crosby et al., 1992). Actuellement, aucune variété résistante ne concurrence la Jonagold.

Les quelques variétés à résistance polygénique obtenues avant 1990 n'ont pas obtenu plus de succès commercial que les variétés à résistances monogéniques. De nouveaux programmes, démarrés dans les années 1990, ont réintégré dans les schémas de sélection des variétés paysannes tolérantes ou résistantes datant d'avant les années trente afin de diversifier les sources de résistance (Lateur and Populer, 1994; Lespinasse et al., 1999).

### c. Agro-écologie

- **Résistance systémique induite (RSI)**

- Principe agronomique

Le principe de la résistance systémique induite (RSI) est d'activer les mécanismes de défense naturellement présents dans la plante, mais qui sont latents, contre un large spectre d'agents pathogènes. Les agents éliciteurs de ces mécanismes de RSI peuvent être des micro-organismes infectieux ou non (champignons, bactéries, virus), des extraits microbiens, des composés organiques ou minéraux ainsi que certains agents physiques. Les modifications métaboliques qui interviennent dans la défense de la plante sont le renforcement de la barrière mécanique, la stimulation d'enzymes de défense ou la production de « protéines de défense » (Lateur, 2002). On assiste dans certains cas également à une mort rapide de cellules pouvant bloquer l'infection. Kuc J. et al. (1959) ont publié des résultats montrant qu'une augmentation de la résistance des végétaux peut être induite par certains acides organiques comme l'acide salicylique. La laminarine, une molécule présente dans des algues marines, possède une action de type RSI.

- Etats de développement

Divers auteurs ne se sont intéressés à la RSI pour les plantes ligneuses que très récemment. Ortega et al semblent être les premiers à avoir montré l'intérêt de ce mode de lutte original appliqué à la tavelure en 1998. En Belgique, aucun produit de ce type n'est agréé pour la lutte contre la tavelure. De nombreux travaux restent à développer afin d'améliorer la formulation des substances ayant une action RSI mais aussi pour déterminer les doses et les meilleurs moments d'application. Enfin, ce type de produits pose des problèmes au niveau de leur agrégation car ils doivent suivre les mêmes procédures que les produits phytopharmaceutiques classiques. De même, des recherches fondamentales doivent encore être réalisées afin de mieux comprendre les mécanismes biochimiques de défense. Des projets sur la RSI sont en cours au centre de recherche agronomique de Gembloux.

- **Lutte biologique**

- Principe agronomique

*Chaetomium globosum*, ascomycète de l'ordre des Sordariales (Dématié) est le meilleur antagoniste de *Venturia inaequalis*. Il réduit la tavelure sur les jeunes pommiers (Bosshart et al., 1987; Duval J., 1992). *Athelia bombacina*, un basidiomycète, appliqué sur des feuilles tombées à l'automne, a pu contrôler à 100% la formation de périthèces et la production d'ascospores (Duval J., 1992; Miedtke U. and Kennel W., 1990).

---

<sup>60</sup> Nous utiliserons cette appellation « variétés « Vf » » pour « variétés résistantes ».

- **Fongicides botaniques (extrait de plante), produits chimiques doux et produits organiques**

- Principe agronomique

Certains extraits de plantes ont le pouvoir de freiner le développement et quelquefois de tuer le champignon de la tavelure. Gilliver a testé 1915 espèces de plantes pour leur effet sur la germination des conidies de *V. inaequalis* et a trouvé 440 espèces qui inhibaient cette germination (Gilliver K., 1947). Tous les espèces de la famille des primulacées (primevère, lysimaques,..) ont des effets fongicides contre la tavelure. Pratiquement, les plantes utilisées par certains producteurs biologiques sont le bouleau et surtout la prêle, sous forme de purin végétal ou de décoction.

Les produits antitranspirants pour les plantes comme les cires créent une pellicule qui empêche les spores d'infecter les tissus (Duval J., 1992).

Les produits organiques comme les émulsions d'huile de soya ou de canola agissent à la façon des antitranspirants. Les extraits de compost permettent de contrôler plusieurs maladies. Le petit-lait non-pasteurisé contient des acides qui auraient des propriétés antiseptiques contre la tavelure et autres maladies (Duval J., 1992).

- **Penser le verger différemment**

- Principe agronomique

La configuration du verger actuel (vergers basses-tiges industriels, culture mono-variétale, espacement réduit, ...) est propice au développement du champignon de la tavelure qui peut s'y reproduire de manière optimale. Une innovation alternative de prévention et de lutte contre la tavelure est de faire un tout autre verger, de diversifier au maximum les variétés plantées et les fruits. Des travaux suisses tendent à démontrer qu'un verger planté avec deux variétés sensibles (50% de chaque) peut aboutir à des niveaux de pression de tavelure plus faibles que ceux prévalant dans un verger d'une seule de ces variétés, du moins si la combinaison de ces deux variétés est bien réfléchiée en fonction de la base génétique de l'interaction hôte/parasite (Keuler and Gessier, 1985).

Les techniques suivantes qui diversifient le verger diminuent l'impact de la tavelure :

- Vergers plus aérés (espace interlignes et entre les arbres)
- Haies interlignes (Barrières contre la dispersion des conidies)
- Réduction de la taille des parcelles
- Vergers multi-variétés (choisies pour réduire la pression des maladies)
- Vergers multi-fruits (pommes, poires, cerises,...)
- Vergers hautes-tiges, pré-vergers, agro-foresterie

- Etats de développement

Cette innovation est novatrice. Elle n'est pas encore utilisée maintenant. Des recherches supplémentaires sont nécessaires. On a besoin de plus de recherches là-dessus, par exemple pour savoir quelles variétés planter ensemble. Cette innovation offre des possibilités même si la recherche sur ce sujet est limitée. Elle est surtout stimulée par les besoins spécifiques des producteurs bios. La lutte intégrée n'a pas encore besoin de cette méthode (Creemers P., 2003).

#### **d. Innovations institutionnelles**

Les normes minimales de résistance pour l'inscription au catalogue des variétés seront au détriment des variétés sensibles.

La valorisation d'anciennes variétés tolérantes ou résistantes et leur redécouverte notamment via la recherche, la diversification des variétés vendues en grande distribution et la promotion d'une prise en compte de critères écologiques au moment de l'achat du fruit favorise également à la promotion de variétés résistantes. L'augmentation de l'importance de la filière bio redéfinira les stratégies de lutte contre la tavelure. De même, l'interdiction ou la restriction de fongicides efficaces contre la tavelure favorisera les techniques ne les utilisant pas.

La promotion des variétés résistantes afin qu'elles soient concurrentielles sur le marché augmenterait leur utilisation et donc diminuera la dose de fongicides utilisés. La promotion des variétés résistantes peut se faire par exemple via la vente directe. Elle reconfigure l'ensemble du système de commercialisation décrit jusqu'ici (standardisation des variétés, masse critique, critères de qualité du fruit, importance du marketing, ...). Les criées et la grande distribution n'intervenant plus entre le producteur et le consommateur, la relation entre ceux-ci est radicalement différente.

Les clubs, organisations entre les différents membres de la filière sont capables de lancer une variété actuellement, elle ne favorise pourtant pas les variétés résistantes. Mais des associations comme par exemple de pépiniéristes ou de producteurs pourront lancer de nouvelles variétés résistantes.

**Tableau 37 : Synthèse des innovations institutionnelles**

Innovations institutionnelles	Description
Promotion des variétés résistantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vente directe (accroît la diversification des variétés)</li> <li>➤ Valorisation d'anciennes variétés tolérantes ou résistantes</li> <li>➤ Diversification des variétés vendues en grande distribution</li> <li>➤ Promotion d'une prise en compte de critères écologiques au moment de l'achat du fruit</li> <li>➤ Les clubs</li> </ul>
Promotion de la diminution des fongicides	Renforcement de la législation sur les fongicides
	Normes minimales de résistance pour l'inscription au catalogue des variétés
	Amélioration des systèmes d'alertes (inclure les facteurs biologiques)

#### **4.3.2. Synthèse des principes agronomiques des innovations**

**Tableau 38 : Principes agronomiques des innovations**

Innovations	Principes agronomiques
Génie génétique	Insertion d'un gène AMP dans le génome d'une variété commerciale
Amélioration variétale classique	variétés tolérantes ou résistantes à la tavelure et commerciales variété meilleure que la Jonagold
Agro-écologie	Activation des mécanismes de résistance du pommier contre la tavelure par l'application d'extrait de végétaux, composés organiques,...
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Agents éliciteurs de RSI : résistance systémique induite.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Lutte biologique</li> </ul>	Application d'antagoniste, principalement des champignons contre la tavelure
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fongicides organiques</li> </ul>	Application d'extrait de plantes, de cire ou des produits organiques, comme des huiles pour diminuer l'impact de la tavelure
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Penser le verger autrement</li> </ul>	Diversifier le verger en plantant des arbres fruitiers différents, variétés différentes
Innovations institutionnelles	Promotion des variétés résistantes, de la diminution des fongicides

## 4.4. Liens entre innovations et filière

### 4.4.1. Facteurs techniques et de développement socio-économiques aux voies d'innovation

#### a. Génie génétique

- **Facteurs techniques**

Les avantages et les inconvénients des pommiers transgéniques résistants à la tavelure sont présentés au point 2.4.2.a.

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Les facteurs de développement socio-économiques comme les risques pour l'environnement, la controverse actuelle des plantes génétiquement modifiées, la législation, etc. seront décrits plus en détails aux points 3.4.2.b Aspects sanitaires et environnementaux 3.4.2.c Aspects socio-économiques.

#### b. Amélioration végétale classique

- **Facteurs techniques**

Les facteurs techniques des variétés résistantes à la tavelure ont déjà été présentés lors de la description des avantages et inconvénients de la résistance variétale 4.2.3.d.

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Les obstacles rencontrés par les variétés résistantes à la tavelure ont été présentés au Tableau 36. Les difficultés de lancement des nouvelles variétés (masse critique<sup>61</sup>, renommée de quelques variétés commerciales, ...) participent à bloquer le développement de variétés résistantes. L'allongement des circuits de commercialisation a, par ailleurs, rendu le frigo industriel incontournable, modifiant en même temps les critères d'évaluation de la qualité du fruit (fermeté et résistance aux maladies de conservation, tenue lors de la conservation au niveau du goût). Toutefois, l'écologisation des politiques nationales de certains gouvernements et l'interdiction d'un nombre croissant de pesticides par les autorités européennes vont venir, renforcer le développement de ces variétés. De même, la sensibilisation croissante des consommateurs aux problèmes de l'agriculture industrielle chimique et la naissance de structures commerciales faisant la promotion de ces variétés vont jouer un rôle dans leur développement.

Créer une nouvelle variété de pommier est un processus long et coûteux. Il faut compter en moyenne cinq ans pour une génération de pommiers : un programme d'amélioration qui en requiert plusieurs peut donc facilement prendre quinze à vingt ans. Cette longue période et la faible probabilité de réussite (une variété est créée à partir des milliers de pépins plantés) entraînent des coûts relativement importants pour les créateurs, qu'il s'agissent de stations d'amélioration publiques ou (semi)-privées. De plus, la création de variétés à résistance polygénique est plus difficile à réaliser que les variétés à résistance monogénique et elle avait parfois été écartée car jugée trop complexe par rapport à la stratégie « Vf ».

Pour résumer, les variétés de pommier sont soit sensibles à la tavelure, soit sensibles au marché. Les deux caractéristiques n'ont pas encore été combinées suffisamment bien que pour réussir. Les variétés résistantes n'ont donc pas problématisé, intéressé et enrôlé les acteurs du secteur fruitier : elles ne

---

<sup>61</sup> Masse critique est la quantité initiale pour traiter avec la grande distribution. Pour lancer une nouvelle variété, ses promoteurs doivent donc être en mesure d'assurer l'approvisionnement de la grande distribution durant au moins trois à quatre mois et dans des grandes quantités (par exemple trente tonnes par semaines).

percent pas le marché car elles n'entrent pas dans le réseau socio-technique majoritaire actuel. Ces variétés sont, in fine, vues par tous les acteurs comme des variétés « pour le secteur bio » qui est plus sensible à la question des fongicides et de la résistance aux maladies.

### **c. Agro-écologie : résistance systémique induite**

- **Facteurs techniques**

La résistance systémique induite (RSI) présente des propriétés intéressantes contre la tavelure comme la polyvalence et le large spectre d'action ainsi que l'effet systémique et persistant dans les plantes. Ces substances élicitrices ont une action de type multi-sites, non-spécifique et donc durable. La RSI présente également la possibilité de lutter contre des maladies bactériennes ou mêmes contre certaines maladies virales. L'action de la RSI sur le développement de l'infection par la tavelure entraîne une diminution d'environ 60% de la surface foliaire sporulante sous condition contrôlée (Ortega et al., 1998). Toutefois, il semble par ailleurs que les réactions de défense qui sont induites dans la plante ont un coût énergétique, ce qui pourrait avoir des conséquences sur d'autres réactions métaboliques et donc sur le rendement (Lateur, 2002). La résistance est partielle mais dépend des conditions de culture (plus efficace en conditions contrôlées qu'en plein air. L'expression complète de la RSI exige un certain délai après induction (Lateur, 2002).

- **Facteurs de développement socio-économiques**

Les substances élicitrices présentent l'avantage d'être d'origine naturelle, des composés relativement simples, non coûteux et non toxiques (Lateur, 2002).

La recherche fondamentale sur la RSI n'est pas neuve, mais les résultats scientifiques disponibles, notamment les nombreuses publications de Kuc ont été longtemps ignorés. Malgré l'intérêt évident de la RSI dans la lutte contre des maladies comme la tavelure, le transfert des connaissances des recherches fondamentales en recherches appliquées à l'arboriculture professionnelle ne s'est fait que très tard, dans la fin des années nonante. Des arboriculteurs individuels, biologiques ou biodynamistes, ont testé sur leurs propres vergers différents extraits végétaux mais l'absence d'évaluation de résultats de ceux-ci dans le cadre d'expérimentations scientifiques reconnues a longtemps participé à la non-diffusion des résultats de ces expérimentations éparses. Ces pratiques sont considérées comme marginales. Elles ont été oubliées ou sont peu connues par le secteur.

### **d. Innovation institutionnelle**

Les facteurs techniques et de développement socio-économique n'ont pas été traités pour l'innovation institutionnelle.

### **e. Synthèse des avantages et inconvénients ainsi que les facteurs de développement**

Tableau 39 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement du Génie génétique.

	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé	
			Agr	Pépi	P.pub	Cons	Firme			
	Possibilité de travailler de manière plus précise et plus rapide par transgénèse	?!		?!						
	Elargissement des possibilités de sources de résistances	+								
	Résistance partielle, fongicides toujours nécessaires	-	-							
	Risque d'adaptation des souches de la tavelure (mécanisme de résistance du champignon existe)	?!								
	Réduction de l'utilisation actuelle des fongicides (mais fongicides encore nécessaires) :		+				+	+		
	⇒ Réduction de l'énergie fossile		+			+	+			
	⇒ Diminution de la charge de travail pour les pulvérisations		+			+				
	⇒ Diminution des coûts pour les producteurs		+	?						
	⇒ Diminution du stress des producteurs lors des infections de la tavelure		+			+				
	Nécessité de recherches supplémentaires									
	Prix des plants		?!							
	Séparation de la filière					+	+	? +		
	⇒ Co-existence des différents types d'agriculture : risque de contamination,...		-		-		-	?		
	⇒ Problème de traçabilité et de transparence : coût, charge de travail,...		-		-	?		?		
	⇒ Impact sur la compétitivité des agricultures nationales (ex : coût de la séparation, ...)		?	?	?	?	?			
	⇒ Impact sur l'autonomie et la liberté des agriculteurs à choisir		-,?							
	Impact sur la rentabilité et la structure socio-économique de la chaîne alimentaire				?					
	Impact sur les orientations de recherche									
	⇒ Plus grand intérêt pour le génie génétique, donc plus d'argent et d'emplois			+	?					
	⇒ Moins d'intérêt pour l'amélioration classique et donc moins d'argent et d'emplois			-	?					
	⇒ Impacts sur la disponibilité et la connaissance des méthodes de lutttes actuelles		?	?			?			
	Impact sur l'emploi en agriculture (moins de mains d'œuvre pour les pulvérisations)				?		?			
	Impact sur l'emploi des firmes d'intrants (fongicides...), sur la chaîne alimentaire, recherche		?	?	?	?	?			
	Risque pour la biodiversité (flux de gène, moindre avec les pommiers auto-fertiles)							-,?		
	Impact sur la diversité des (cultures) et des variétés							-,?		
	Effets non-attendus sur l'environnement							?		
	Impact sur la sécurité alimentaire et la santé en général (Toxicité du fruit, moins de fongicides,....)							-,+,?		
	<b>Facteurs de développement</b>		<b>Facteurs stimulants</b>				<b>Facteurs handicapants</b>			
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
	Réglementation publique contraignante								-	
	Opposition et craintes des consommateurs face OGM							-		
	Difficultés d'obtenir des autorisations pour faire leurs essais en plein champ								-	

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=producteur; Pepi=pépinériste; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme d'intrants.

**Tableau 40 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de l'amélioration classique**

Amélioration variétale classique	Avantages et inconvénients		Tech	Socio-Economique					Envi	Santé
			Agr	Pépi	P.pub	Cons	Firme			
	Variétés à résistance monogénique (gène vf) avantage à court terme : résistance presque totale		+	+						
	Variétés à résistance monogénique (gène vf) : inconvénient à long terme risque d'adaptation des souches de la tavelure		-	-						
	Résistance polygénique, avantage : durabilité accrue de la résistance		+	+						
	Résistance polygénique, inconvénient : résistance partielle		-	-						
	Diminution des traitements fongiques (coût, charge de travail, respect de l'environnement,...) :		+	+		?	+	?	+	+
	⇒ Réduction de l'énergie fossile			+		+	+		+	
	⇒ Diminution de la charge de travail pour les pulvérisations			+						
	⇒ Diminution des coûts pour les producteurs			+						
⇒ Diminution du stress des producteurs lors des infections de la tavelure			+						+	
Ne modifie pas fortement la filière comme dans le cas des plantes transgéniques			+	+	+	+	+			
Facteurs de développement		Facteurs stimulants				Facteurs handicapants				
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
L'écologisation des politiques nationales de certains gouvernements				+	+					
Interdiction d'un nombre croissant de pesticides par les autorités européennes vont venir, renforcer le développement de ces variétés					+					
Sensibilisation croissante des consommateurs aux problèmes de l'agriculture industrielle chimique				+						
Naissance de structures commerciales faisant la promotion de variétés résistantes (cfr Les Naturianes)		+								
Amélioration des techniques de sélection et d'amélioration variétale (QTL, marqueurs, etc)		+								
Résultats accrus de recherches effectuées pour l'agriculture biologique, mais utiles à l'arbo conventionnelle		+								
Système de commercialisation ne permet la vente que de quelques variétés et toute nouvelle variété a difficile à se faire une place							-	-		
Fongicides de synthèse étant efficaces d'un point de vue technique, la nécessité de trouver d'autre méthode contre la tavelure est faible							-			

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=producteur; Pépi=pépinériste; P.pub= pouvoir public, Cons=consommateur, public ; Firme= firme d'intrants

**Tableau 41: Avantages / inconvénients et facteurs de développement de la résistance systémique induite, RSI**

RSI : résistance systémique induite	Avantages et inconvénients	Tech	Socio-économique					Envi	Santé	
			Agr	Pépi	P.pub	Cons	Firme			
		Effacité de 50 à 70% contre la tavelure en conditions contrôlées, théoriquement	+, ?							
	Effacité diminuée au champ par rapport aux résultats obtenus en conditions contrôlées	-								
	Nombre incalculable de molécules potentiellement efficaces	+								
	Origine naturelle, composés relativement simples	+					+, ?	+, ?		
	Large spectre d'action, possibilité de lutter contre des maladies bactériennes	+								
	Action de type multi-sites, non spécifique et donc durable	+								
	Effet systémique et persistant dans les plantes	+								
	Respectueux de l'environnement, non toxique						+	+		
	Coût énergétique des réactions de défense pour la plante, diminution du rendement	-								
	Pas encore utilisable pratiquement	-								
	Nécessité de recherches supplémentaires	-					-			
	Ne modifie pas fortement la filière comme dans le cas des plantes transgéniques		+		+	+				
	Facteurs de développement dans le futur		Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
		Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi	
	Développement de l'arboriculture bio			+						
	Intérêt plus faible des firmes privées pour les composés naturels difficilement brevetables						-	-		
	Méthode très peu utilisée et inhabituelle en agriculture							-		
	Problématique de la procédure d'agrément par leurs effets variables et par leur mélange avec des molécules complexes								-	

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=producteur; Pépi=pépinériste; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme d'intrants.

**Tableau 42 : Avantages / inconvénients et facteurs de développement de la lutte biologique (Champignons antagonistes)**

Champignons antagonistes	Avantages et inconvénients		Tech	Socio-économique					Envi	Santé	
				Agr	Pépi	P.pub	Cons	Firme			
	Potentiel théorique de réduction du risque de la tavelure		+, ?	+							
	Intérêt écologique, environnemental						+				
	Nécessité de recherches supplémentaires		-, ?								
	Difficultés à utiliser dans la pratique		-	-							
	Ne modifie pas fortement la filière comme dans le cas des plantes transgéniques			+	+	+	+	+			
	Facteurs de développement			Facteurs stimulants				Facteurs handicapants			
				Tech	Eco	Socio	Loi	Tech	Eco	Socio	Loi
	Difficultés des procédures d'autorisations								-		-
Développement de l'arboriculture bio		+			+						
Intérêt plus faible des firmes privées pour les composés naturels difficilement brevetables								-	-		
Méthode très peu utilisé et inhabituelle en agriculture									-		

« +, - » réfère à des avantages (+) et des inconvénients (-) dans la situation actuelle ou à des facteurs perçus comme stimulants (+) ou handicapant (-) pour le développement de l'innovation dans le futur. « ? » indique un manque d'info et « ?! » indique un point controversé. Tech=technologique et technique ; Agr=producteur; Pépi=pépinériste; P.pub= pouvoir public ; Cons=consommateur, public ; Firme= firme d'intrants

#### **4.4.2. Avantage, inconvénients et impacts potentiels des plantes transgéniques**

Les obstacles aux pommiers transgéniques ne sont pas que d'ordre technique. Nous allons distinguer les aspects agronomiques qui sont d'ordre technique, les aspects sanitaires et environnementaux ainsi que les aspects socio-économiques traitant les craintes de filière, les aspects législatifs et financiers.

##### **a. Aspects agronomiques**

- **Avantages des pommiers transgéniques**

- Impacts sur la résistance

Le gène « AMP » (Anti-Microbial Peptides) confère aux pommiers transgéniques une résistance à la tavelure. Les essais en serre concluent à une réduction de la tavelure de 50% pour le gène « AMP » provenant de l'orge. (Plant Research International, 2001).

- Impact sur la performance variétale

L'opportunité de la transgénèse est en effet de transformer des variétés protégées, dont le succès commercial est déjà garanti afin de leur ajouter des caractéristiques techniques qui en feraient des succès agronomiques, environnementaux et/ou économiques. Ces nouvelles technologies pourront ajouter à la Jonagold une ou plusieurs caractéristiques techniques telles que la résistance aux maladies, l'auto-fertilité, une meilleure productivité...L'approche transgénique est donc le contraire de l'approche conventionnelle, dont l'objectif est de créer de nouvelles variétés qui auront, enfin, à se faire connaître, avec leurs avantages et défauts.

- Plus précis et plus rapide

La transgénèse est une innovation pleine de perspectives pour le secteur fruitier qui, à la différence d'autres cultures, doit travailler avec des cycles longs de programmes d'amélioration. La transgénèse offre alors la possibilité de travailler de manière plus précise et plus rapide, rendant ainsi les programmes de croisements plus efficaces et plus rentables. Certains ont donc décidé d'investir dans de telles activités, à l'instar du Fruitteeltcentrum de la KUL (en vain) et du PRI.

- **Les inconvénients techniques**

La résistance en elle-même risque d'être également problématique. Celle-ci est en effet partielle et potentiellement non-durable. **Partielle**, car la résistance ne fait que réduire l'incidence de la tavelure et dans des proportions pas encore aussi importantes que les meilleures variétés non-transgéniques : les essais en serres concluent à une réduction de 50% (Plant Research International, 2001). Ces pommiers devront donc encore être traités avec des fongicides de synthèses. **Non-durable**, car il est probable que la résistance soit également contournée un jour par des souches s'adaptant au nouveau mécanisme. Ce contournement de la résistance est un des risques potentiels pour les arbres fruitiers transgéniques.

Les pommiers possédant le gène « AMP » provenant des Pétunia et des oignons qui a été développée par la FTC, n'a pas été un succès. La susceptibilité des arbres à la maladie n'est pas stoppée à cent pour cent et les arbres poussaient mal.

##### **b. Aspects sanitaires et environnementaux**

Les pommiers transgéniques pourront avoir des effets sur des organismes non-cibles. On pourrait assister à une instabilité de l'expression du transgène, à une diffusion des transgènes dans l'environnement (Genetic Engineering Newsletter, 2002).

- **Utilisation d'un gène de résistance à un antibiotique**

La présence d'un gène de résistance à un antibiotique est nécessaire dans le laboratoire lors d'une étape de la création des pommiers modifiés, mais ce caractère est inutile dans le verger. L'utilisation d'un tel gène peut présenter un risque de baisse de l'efficacité des antibiotiques dans la médecine humaine (suite à une éventuelle généralisation des antibiotiques dans les aliments).

- **Toxicité des fruits**

La toxicité liée à la production d'une protéine non naturellement présente dans le fruit peut également engendrer des problèmes.

- **Diminution de la quantité de fongicides**

L'utilisation de variétés transgéniques résistantes à la tavelure diminuera le nombre de traitements fongiques et donc l'impact négatif que les fongicides ont sur l'environnement et la santé humaine. Les producteurs seront, donc, également moins sous pression lors des pulvérisations. En effet, avec les variétés sensibles, le producteur a peur de manquer des pulvérisations pendant la période critique d'infection et ainsi causer des pertes de rendement importantes à cause de la tavelure.

### c. Aspects socio-économiques

- **Séparation des filières et coexistence des cultures**

Par les deux réglementations européennes relatives à l'étiquetage et à la traçabilité d'organismes génétiquement modifiés (OGM) entrées en vigueur au mois d'avril 2004, la ségrégation de la filière classique et transgénique demandera une traçabilité et un étiquetage efficace ainsi qu'une gestion des parcelles traditionnelles ou transgéniques soigneuse. Ce type de dispositif garantit le libre choix du consommateur, de l'agriculteur ainsi qu'une sécurité sanitaire et environnementale. Les pommes provenant des pommiers transgéniques devront être étiquetées avec la mention stipulant qu'elles proviennent de plantes génétiquement modifiées<sup>1</sup>. Cette ségrégation aura un coût et une charge de travail supplémentaire aussi bien pour les producteurs que les criées.

- **Coût de la technologie et revenu agricole**

Etant donné qu'aucun pommier transgénique n'est encore disponible sur le marché, il est difficile d'évaluer à présent le prix de la technologie. Toutefois, ceux-ci permettront de diminuer le coût des traitements fongiques pour les producteurs.

- **Aspects législatifs**

Les promoteurs de pommiers transgéniques ont un obstacle spécifique à surmonter : la difficulté à obtenir des autorisations pour faire leurs essais en plein champs. Ceux des pommiers résistants à la tavelure ont essuyé deux refus, celui des Pays Bas et de la Belgique (Minister van Consumentenzaken, 2002) avant d'être finalement acceptés par les Pays-Bas, en 2003. D'autres essais ont été refusés en Allemagne (Genetic Engineering Newsletter, 2002). La présence d'un gène de résistance à un antibiotique est un des éléments du refus des autorités. Ce caractère est inutile dans le verger mais nécessaire dans le laboratoire lors d'une étape de la création des pommiers génétiquement modifiés. L'utilisation d'un tel gène sera interdite après 2006, suite à une décision des autorités européennes de prévenir tout risque de baisse de l'efficacité des antibiotiques dans la médecine humaine. Une nouvelle méthode doit donc être trouvée, n'utilisant pas d'antibiotique et des pommiers recréés à partir de celle-ci.

---

<sup>1</sup> Les denrées alimentaires doivent à présent être étiquetées lorsqu'elles contiennent plus de 0,9 % d'OGM, qu'elles soient ou non destinées à la consommation humaine.

- **Aspects sociaux liés à l'utilisation de pommiers transgéniques résistantes à la tavelure**

Les consommateurs ne problématissent, eux, pas réellement sur la tavelure ou sur les fongicides, a fortiori sur la sensibilité des variétés. Quand ils le font, c'est en tant que citoyens (opposition générale aux pesticides) mais non dans les actes d'achats, à l'exception d'une minorité. Les innovations transgéniques n'intéressent pas les consommateurs, qui y sont fortement opposés.

Enfin, les pommiers transgéniques ont un inconvénient prépondérant par rapport au soja, betterave ou au maïs génétiquement modifié : le rapport du consommateur à l'aliment est direct. Le consommateur face à un produit génétiquement modifié brut comporte un aspect culturel, tandis que l'ingestion de maïs ou de soja est diffuse dans de nombreux aliments transformés. Il est donc probable que la commercialisation de tels fruits transgéniques cristallise l'opposition des consommateurs et qu'aucun acteur privé ne soit prêt à promouvoir leur commercialisation. Faire le lien entre les pommiers transgéniques et la question des fongicides pourrait encourager le consommateur à s'intéresser davantage à ses modes d'alimentation.

- **Moteur pour le génie génétique**

Plus de recherches sont réalisées sur le génie génétique, car le fonctionnement actuel de la recherche scientifique favorise les travaux aboutissant à des publications rapides dans les revues les plus renommées, dans quelques disciplines renommées (comme par exemple des travaux en laboratoires, en biologie moléculaire). Ce fonctionnement entrave les recherches sur le terrain et à long-terme n'offrant que bien moins de possibilités de publications valorisables (p.ex des essais en champs pendant plus d'une dizaine d'années de vergers agro-écologiques). Des publications de recherches à long terme sont pourtant possibles, même si moins courantes.

Les financements des recherches, même public, privilégient également les travaux dont les perspectives sont à court terme. Ils contiennent, par ailleurs, des critères de valorisation industrielle des résultats obtenus<sup>1</sup>.

Ces aspects de la recherche, combinés avec des effets de modes, sont des tendances lourdes. La génétique aujourd'hui, après la chimie de synthèse hier, est la discipline de pointe qui mobilise les énergies des chercheurs plus que l'agro-écologie, encore isolée. C'est ainsi que la génétique est aujourd'hui favorisée pour résoudre le problème de la tavelure, problème justement suscité par la chimie de synthèse.

Les pommiers transgéniques favoriseraient les centres de recherches axés sur les biotechnologies au détriment de ceux qui ont investi dans les programmes d'amélioration classiques.

---

<sup>1</sup> Les industries des produits phytosanitaires ont d'ailleurs développé de profonds liens avec les centres et association d'institutions de recherches. La station de Gorsem s'appelait par exemple initialement Gorsak, une filiale de Bayer. Second exemple, le financement d'un atelier scientifique international sur le feu bactérien en arboriculture (en Belgique) par toutes les plus grandes firmes phytosanitaires. Quelle chance a une publication agro-écologique de passer dans ce type de rencontre ? L'enquête devrait être élargie à ce genre d'aspects.

---

## Partie 3 : Conclusion

*Gaëtan Vanloqueren*

---

## 5. Conclusions du projet de recherche. Passer d'études de cas au développement d'une nouvelle approche d'évaluation des plantes transgéniques

---

La version originale de ce texte rédigée en anglais, langue d'usage dans les administrations qui gèrent, en Belgique et à l'étranger, les questions relatives aux plantes transgéniques, et dans les milieux scientifiques. Les parties directement en lien avec le cahier de charges de ce projet sont cependant données en français afin de donner une unité à ce travail et de satisfaire aux critères administratifs en vigueur pour ce projet de recherche. La version originale peut être demandée aux auteurs<sup>1</sup>.

Notre projet de recherche avait pour objectif d'analyser la possibilité d'une évaluation systémique des plantes transgéniques et d'en proposer une méthodologie. Etant donné les limites de temps et de moyens de ce projet de recherche modeste, et en sachant que l'approche systémique d'innovations en agriculture est une discipline récente, les résultats donnés dans ce rapport sont préliminaires. Nous ne prétendons pas à l'exhaustivité. Nous proposons cependant plusieurs conclusions qui, si elles sont mises en œuvre, pourraient contribuer à des politiques publiques plus complètes dans certains domaines.

La première section introduit le Protocole de Carthagène. La seconde section analyse les avantages et les inconvénients de notre « approche systémique de la pertinence des plantes transgéniques ». La troisième section suggère des améliorations de cette méthode et la quatrième section suggère une grille de critères pour une évaluation de tous les aspects concernés par une innovation scientifique comme les plantes transgéniques.

### 5.1. Le Protocole de Carthagène

Le Protocole de Carthagène (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2000) est actuellement centré sur l'évaluation des risques de biosécurité et donne très peu d'importance aux aspects socio-économiques.

L'annexe 3 du Protocole détaille les procédures à mettre en œuvre en ce qui concerne les enjeux de biosécurité. La pratique d'évaluation du risque pour la biosécurité est bien connue des scientifiques, même si elle fait l'objet de constantes modifications et de controverses, et fait l'objet de réglementations internationales, comme la directive 2001/18 (Nihoul and Mahieu, 2005; European Commission, 2001). En ce qui concerne les aspects socio-économiques, l'article 26 donne quelques informations générales comme la possibilité pour les parties de prendre en compte des considérations socio-économiques « consistantes avec leurs obligations internationales » et l'importance de la coopération entre les parties pour le partage de la recherche et d'information sur les impacts socio-économiques.

Le Protocole est donc très peu équipé pour donner des procédures claires, voire même des « guidelines » qui détailleraient ce que les considérations socio-économiques recouvrent. Les négociations qui ont eu lieu depuis la signature du protocole ont déjà abordé ces questions. Nous tentons de contribuer à ce défi, celui d'opérationnaliser des principes généraux dans une méthode d'évaluation. Notre référentiel est bien celui du monde réel (que nous analysons à travers notre approche systémique) et non celui, plus étroit, du Protocole. Nous laissons aux responsables fédéraux

---

<sup>1</sup> [vanloqueren@gena.ucl.ac.be](mailto:vanloqueren@gena.ucl.ac.be)

le soin de tirer les résultats les plus intéressants pour l'amélioration du Protocole, même si nous tentons de jouer le jeu, et que nous sommes prêts à poursuivre l'expérience.

## **5.2. Avantages et inconvénients de l'approche systémique de la pertinence des plantes transgéniques**

Notre approche est brièvement résumée dans la première partie de ce rapport et est présentée extensivement ailleurs (Vanloqueren and Baret, 2004a; Vanloqueren and Baret, 2004b). Elle a été reconnue comme une méthode intéressante pour évaluer les aspects socio-économiques des biotechnologies (World Resources Institute, 2005). Elle reste cependant à un stade expérimental qui nécessite davantage de travaux de développement méthodologique et devra être testé dans d'autres contextes que ceux des études de cas de la partie 2 de ce rapport?

Nous identifions quatre avantages et trois limites actuelles à notre méthode:

### Les principaux avantages sont

- 1) Accorder la plus grande importance à l'objectif des innovations (la plante transgénique) et non aux seuls risques et impacts de cette plante transgénique dans une perspective réduite, comme dans les évaluations de risques pour la biosécurité.
- 2) Permettre les comparaisons avec des innovations alternatives qui ont le même objectif.
- 3) Prendre en considération à la fois les innovations technologiques et les innovations institutionnelles qui peuvent contribuer à l'objectif initial (comme la réduction des problèmes de maladies dans un champ)
- 4) Analyser les facteurs techniques et socio-économiques qui agissent sur le développement des voies d'innovations, pour donner une meilleure vue des différences entre l'innovation scientifique "dans le laboratoire" et celle qui arrive "dans le champ".

### Les principales limites de l'approche telle que présentée dans la partie 2 de ce rapport sont:

- 1) Le manque d'indicateurs, de facteurs concrets pour une généralisation de l'approche à d'autres cas et la mise en oeuvre de l'approche dans les procédures réglementaires.
- 2) Une analyse insuffisante du niveau de développement des voies d'innovation.
- 3) Une absence d'évaluation du potentiel de chaque voie d'innovation à être utile pour l'agriculture dans le court et le long terme.

Les deux prochaines sections touchent à ces inconvénients actuels. L'objectif reste le développement d'une approche d'évaluation qui puisse être menée par une personne ou une équipe de personnes qui soient indépendantes du secteur concerné (par exemple, un chercheur ou un fonctionnaire). Ces personnes peuvent en conséquence ne pas être des experts de la culture concernée mais disposent d'une formation suffisante en agronomie et en économie rurale. La méthode repose donc sur une partie de récolte des informations (auprès des acteurs de la filière agricole, dans la littérature scientifique, etc.) et une partie d'analyse, qui est la plus complexe.

### **5.3. Amélioration de la méthode d'évaluation systémique de la pertinence**

#### **5.3.1. Une grille de critères pour évaluer les innovations scientifiques en agriculture**

La grille de critères que nous avons développée est basée sur une revue des critères discutés dans la littérature<sup>1</sup>, sur nos propres études de cas et sur nos expériences. Elle est composée de groupes et de sous-groupes. Elle inclut des critères environnementaux, agricoles, socio-économiques et sociétaux de même que les dimensions moins facilement paramétrisables, comme l'incertitude ou les effets cumulés à long terme.

Cette liste n'est pas exhaustive mais recouvre un nombre important de dimensions potentiellement affectées par les plantes transgéniques. Elle pourrait faire l'objet d'une discussion entre scientifiques et fonctionnaires, dans un objectif d'amélioration.

Un travail supplémentaire devra s'attacher au choix de la méthodologie pour répondre à chaque critère, à la fixation d'unités, à la hiérarchisation des critères entre eux, etc.

#### **5.3.2. Evaluer et comparer des voies d'innovations : approfondissement de la méthode**

La grille de critères donne une synthèse de tous les impacts potentiels qui peuvent être évalués. Nous suggérons toutefois différentes étapes pour analyser comparativement l'innovation transgénique et les autres innovations.

##### **a. Evaluation des niveaux de développement des voies d'innovations**

La comparaison des plantes transgéniques avec l'ensemble des innovations ou des pratiques qui permettent de résoudre les principaux problèmes agricoles ou environnementaux est souhaitée par de nombreux observateurs et acteurs du débat sur les plantes transgéniques. Etant donné que ces voies d'innovations sont à des niveaux d'aboutissement différents, il est cependant nécessaire de se donner des outils pour cette comparaison.

L'évaluation des niveaux de développement des différentes voies d'innovation permet par exemple d'identifier quelles voies d'innovation sont au niveau conceptuel, au niveau des essais en laboratoires, en champs d'essais ou au stade commercial « ready-to-use ». Ceci est un premier indicateur de la « compétitivité » entre innovations comparables. Cette évaluation devrait aussi analyser quel effort de recherche a été fait par la recherche publique et par les acteurs privés sur chaque voie d'innovation, afin d'identifier si le potentiel de chaque voie d'innovation a été testé ou au contraire reste ignoré. Une voie d'innovation qui a reçu peu de budgets de recherche peut ne pas avoir encore produits de résultats satisfaisants, ce qui est normal, à la différence d'une voie d'innovation qui aurait reçu des investissements majeurs dans les centres de recherche publics et privés et qui n'aboutirait toujours pas à une solution satisfaisante. Le potentiel de la seconde voie d'innovation

---

<sup>1</sup> This short uncomplete list illustrates how authors contribute, each in their own fields of expertise, to the building of a wide array of criteria for a systemic assessment. For environmental impacts, see for example (Wolfenbarger, 2000; Clark et al., 2002; Chevassus-au-Louis, 2002; Pretty, 2001; Altieri, 2000; Ervin et al., 2003). For an analysis of the contribution of innovations to sustainable agriculture, see (Hubbell B.J., 1998b; Lewis W.J. et al., 1997; Levidow, 2000; Hails, 2002). For socio-economic and ethical impacts, see (Altieri, 2000; International Council for Science (ICSU), 2003; Robinson, 1999; Chevassus-au-Louis 2001; Pretty, 2001; Hubbell B.J., 1998a; Cooke, 2003; Lacy and Busch, 1991; Ingeborg and Traavik, 2003; Bonny, 2222; Comstock, 2004; Beekman, 2004; Pouteau, 2000; Mephram, 2000; Carr and Levidow, 2000; Karlsson, 2003) For comparative analysis of alternative strategies and scenarios, see (Trewavas, 1999) (Mayer and Stirling, 2002). For our own previous applications of systems analysis to transgenic crops, see (Vanloqueren and Baret, 2004a; Vanloqueren and Baret, 2004b).

pourrait plus facilement être évalué faible, comparé au potentiel de la première, qui reste à découvrir<sup>1</sup>.

Etapas méthodologiques pour une telle évaluation :

1. Revue bibliographique et analyse bibliométrique des publications existantes, pour évaluer l'importance de la voie d'innovation dans les publications scientifiques (un indicateur de l'intérêt de la communauté scientifique et des efforts de recherche)
2. Inventaire des projets de recherche financés sur chaque voie d'innovation (à l'échelle européenne par exemple, voire internationale car le développement des plantes transgéniques est internationalisé).
3. Analyse de la présence des voies d'innovation dans les programmes politiques importants pour l'avenir de la recherche (Livres Blancs, Programmes-cadres de l'Union Européenne).
4. Inventaire des brevets sur des plantes données et inventaire de ces propriétaires. Ces inventaires sont des indicateurs de l'importance de certaines voies d'innovation, comme le génie génétique, pour ces plantes.
5. Interviews de scientifiques et d'acteurs des filières agricoles dans chaque domaine concerné, pour obtenir les informations vitales sur le développement des innovations dans leur filière (informations qui ne sont pas dans les publications et les bases de données des projets de recherche.).
6. Analyse systémique des principaux résultats obtenus par les recherches jusqu'à aujourd'hui (recherches identifiées aux points 1,2 et 5) afin d'identifier les succès et échecs de la voie d'innovation.
7. Analyse prospective du potentiel de chaque voie d'innovation à différentes échelles temporelles (5, 10 et 20 ans) dans plusieurs scénarios d'évolution du contexte socio-économique et politique (prix des matières premières agricoles, de la terre, des intrants, politiques agricoles, etc.).

## **b. Evaluation du potentiel de chaque voie d'innovation**

Le transfert de la recherche sur les différentes innovations aux agriculteurs dépend de nombreux acteurs techniques mais aussi de facteurs socio-économiques. Ceux-ci doivent donc aussi être pris en compte.

Etapas méthodologiques pour une telle évaluation :

1. Les analyses des innovations au stade commercial pour chaque voie d'innovation, dans différents pays et pour différentes cultures<sup>2</sup> peuvent être réalisées par une recherche initiale dans la presse agricole et la littérature scientifique, bien que celles-ci se concentrent plus sur les aspects de « recherche » que de « développement » et doit être complétée par des enquêtes dans les filières agricoles, auprès des firmes privées proposant ces produits.
2. Une enquête auprès des scientifiques et des acteurs des filières est cruciale pour l'évaluation du potentiel des voies d'innovations. En effet, l'information à ce sujet est en général, difficile à

---

<sup>1</sup> Many contemporary research shows that continued efforts on an innovation pathway by scientific research as well broader R&D budgets, including investments in technological tools could dramatically reduce the costs of the real use of this innovation in a few years, such as insect biological control in horticulture, turning an "utopian" innovation pathway into a successful horticultural strategy promoted by small and middle private firms.

<sup>2</sup> If an innovation pathway has been very successful in a number of countries and for different crops and problems, it could be a good indicator for high potential to be successful for other crops if no strictly scientific arguments stand up for the contrary.

trouver dans les publications régulières et rien n'équivaut l'expérience humaine accumulée par les personnes qui connaissent aux mieux la recherche faite sur une plante ou sur une voie d'innovation ainsi que les pratiques actuelles. Des interviews avec les responsables des départements R&D des firmes privées et des institutions de recherche publiques devraient être menées, ainsi que des interviews avec les autres acteurs des filières<sup>1</sup>.

3. Les procédures participatives se sont avérées efficaces dans plusieurs cas d'évaluation d'innovations scientifiques et il serait utile d'explorer la faisabilité d'utiliser de telles approches méthodologiques pour évaluer le potentiel des voies d'innovations à résoudre un problème particulier ou un objectif défini.
  - Une évaluation cartographique multi-critères (multi-criteria mapping" assessment method) a été proposée pour évaluer différents scénarios pour l'agriculture anglaise : plantes transgéniques, agriculture conventionnelle ou agriculture biologique (Stirling and Mayer, 1999; Mayer and Stirling, 2002).
  - L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA, France) a mené un processus participatif sur le cas des vignes transgéniques résistantes à un virus, après une énorme controverse sur celles-ci. Le processus comportait notamment des rencontres entre scientifiques et représentants des différents acteurs concernés (Bertrand et al., 2004).

---

<sup>1</sup> Here, several aspects would have to be taken into account for a satisfactory analysis. First, the fact that research is so specialized that many scientists will not know much about an innovation pathway on which they did none or little research. It would be necessary to interview prominent scientists of the innovation pathway in itself (these scientists may be abroad). Secondly, it will be necessary to separate between the technical facts that argue for a weak potential of an innovation strategy (such as if no predator has been found for a particular pest after a very large screening of all potential predators in the different continents) and other various socio-economical factors that many scientists and stakeholders argue to dismiss the validity of several innovation pathways for real agricultural use (such as the cost of its application, which is a variable factor depending upon many trends ; or the fact that industry opposes cultivar mixtures because it wants homogeneous commodities, which is something that may be changed in the future). The basic assumption underlying the general approach should be taking into account all factors but separating between different types of information and organizing it for an informed decision by different types of decision makers (public authorities, scientists, etc.).

## 5.4. Grille de critères pour une évaluation systémique de la pertinence des plantes transgéniques

Cette grille de critères devra être discutée avec des scientifiques, des fonctionnaires et des acteurs de filières agricoles et agro-alimentaires, pour être au plus proche possible des enjeux réels. Elle devrait aussi être complétée pour contenir des critères qui évaluent les impacts des plantes transgéniques (même cultivées ou vendues au Nord) sur les pays en voie de développement.

GROUPS & SUB-GROUPS	CRITERIA	Additional information
<b>1. ENVIRONMENTAL</b>		
<b>Genetic pollution</b>	Risk on biodiversity due to gene flow?	Impact due to (1) spread of the transgenic plants in the environment or (2) to transfer of the inserted genetic material to other organisms (weeds, bacteria,...)
<b>Biodiversity</b>	Risk on biodiversity due to direct ecological effect ?	(1) impacts on non-target plants and animals (toxicity, lack of food, ...) (2) on beneficial insects ; due to (a) associated agricultural practices (b) due to new functions by the transgenic plants (Ex : Bt toxin)
<b>Agrobiodiversity</b>	Impact on diversity of crops and of crop varieties ?	Impact (reduction/increase) in the diversity of varieties/cultivars used for this crop
<b>Chemical use</b>	Impact on reduction of existing chemical use ?	
	Impact on relative toxicity of pesticides, fungicides and herbicides used ?	The impact on environment (water, air, soil, wildlife) include direct and secondary effects : (1) Effects of broad-spectrum herbicides, use of specific herbicides for resistant weeds/volunteers (2) Non-target effects of insect resistance (toxic effects) (3) Fate and consequences of insecticidal toxins in soil
<b>Landscapes</b>	Impact on diversity and quality of land use ?	The impacts can be due to a change in land use as a consequence of : (1) Crop rotations schedule altered (2) Crops in new areas (where not planted before) (3) Substitution between products allowing culture of one major crop rather than 3-4 other types (Ex : Utilisation of GM multi-purpose plants : colza producing olive oil ) (4) Change in land cover over the year (5) acceleration of the trend to monoculture
<b>Energy use</b>	Impact on energy use of associated practices ?	Via use of fossil fuels, chemical intrants, etc.
<b>Unexpected effects</b>	Unexpected effects on environment ?	Ex : Phenotypic and genetic instability
<b>2. AGRICULTURAL</b>		
<b>Coexistence of cultures</b>	Impact on the possibility of coexistence of different types of agriculture ?	Does the practice poses a risk of contamination of conventional and organic crops and seed systems (via gene flow, ... ), on the short and long run ?
<b>Weed and pest control</b>	Impact on availability of current pest management methods ? Is the innovation/strategy itself sustainable on the long run ?	Is there a risk of reduced efficiency of current pests, disease and weed control methods ? (Ex : some people suggest there is a risk of resistance evolution such as the development of weeds/insects/virus populations resistant to herbicide/Bt toxins) (Ex : superweeds, volunteers, ..)

<b>Agricultural practices</b>	Impact on current agricultural practices ?	Via (1) Impact on difficulty/easiness to practice various types of crop rotations ? (The use of certain GM crops, such as the herbicide-tolerant crops, are not best compatible with all crop rotations schemes) (2) Impact on the flexibility of planting/protection treatments periods ?
<b>3. SOCIO-ECONOMIC</b>		
<b>a) FARMERS</b>		
<b>Freedom to adopt or not</b>	Impact on freedom of farmers to choose ?	Two reasons might reduce the freedom to adopt or not : (1) technical impossibility of coexistence of GM and non-GM crops because of progressive contamination of conventional and organic crops and seed systems (via gene flow, ... ) (2) economic difficulties for current non-adopters making it impossible not to adopt in the long-term (late or non-adopters tend to suffer financially, forced into the technological treadmill, except if they find niche markets)
<b>Income</b>	Impact on farmer income ?	Via an (1) increase/decrease of inputs (chemicals and seeds), labour and investments (2) improved yields without price reduction (3) price changes
<b>Quality of work</b>	Impact on quality of work ?	Ex : flexibility of work organization, dangerous use of toxic pesticides, administrative duties
<b>Agricultural practices</b>	Impact on agricultural practices ?	Ex : via a change in persistence or invasiveness of the crop ; weediness of crops (volunteers)
<b>Autonomy</b>	Impact on farmer's autonomy (seeds and crops)?	Does the transgenic plants and associated commercial practices inhibits re-use, sharing and storing by farmers (1) by patent protection, intellectual property rights, liability contracts (2) by use of GURTS (gene use restriction technologies)
	Impact on farmer's autonomy (ability to buy inputs and sell outputs)?	Via an impact (+ or -) on the trend toward contracts integration
	Impact on farmer's autonomy (access to information and advice)?	Via an increase of power of private companies and/or a decline of public agricultural extension service
<b>b) AGRO-FOOD CHAIN</b>		
<b>Agro-industrialisation</b>	Impact on the socio-economic structure of the agro-food chain ?	Ex : some innovation may allow greater opportunities for agro-industrialization such as via (1) vertical integration/concentration at different stages of food chains (Ex : GM plant linked with use of herbicide favours concentration between seed and chemical firms) (2) increasing substitution opportunities between products (3) by increasing production of major crops (commodities) for export instead of local foods in southerne countries
<b>Profitability</b>	Impact on profitability in the food chain ?	Via an impact on (1) costs of inputs, labour, processing, controls (2) value added
<b>Competitiveness</b>	Impact on competitiveness of national agriculture (exports and imports) and agro-industry ?	Via new or lost markets
<b>Breeding</b>	Impact on classical breeding programmes and firms ?	
<b>Stability</b>	Impact on stability of food chain ?	Does the introduction of the innovation increase/decrease/has no impact on the food chain stability to food chain crisis

<b>c) CONSUMERS</b>		
<b>Food safety</b>	Impact on food safety ?	Risk of allergenic and immune system reaction to new substances ; antibiotic resistance marker genes
<b>Health</b>	Impact on general health ?	via pesticides residues, ...
<b>Nutrition</b>	Impact on nutrition ?	via nutritious contents of foods
<b>Affordability</b>	Impact on retail price ?	
<b>Transparency</b>	Impact on transparency of consumer information ?	
<b>Choice</b>	Impact on freedom of consumers to choose ?	Freedom of choice is expected to be ensured by traceability and labelling schemes but 'relative' freedom of choice includes accessibility (are the different products sold everywhere and at an affordable price) ?
<b>Trust</b>	Impact on trust in food chain and broader agriculture ?	Does the introduction of the innovation increase/decrease/has no impact on consumer trust ?
<b>4. SOCIETAL</b>		
<b>Food security</b>	Impact on general food security ?	Contribute to improve/decrease current and future general level of food security ?
<b>General employment</b>	Impact on employment in agriculture ?	Contribute to accelerate or decelerates the general decrease of employment in agriculture (# of farms and # of farmers) ?
	Impact on employment in agro-food chain ?	
	Impact on employment in research and development ?	
<b>Farm and rural communities</b>	Impact on farm and rural communities?	Impact on decline of number farms, farm employment, etc...
<b>Distribution of revenues</b>	Impact on distribution of benefits of the technology ?	Via impact on (1) Distribution of benefits between biotech company, farmers, consumers, externalities (2) fair sharing of benefits of use of original genetic resources ?
<b>Institutions</b>	Impact on concentration of economic power in the agro-food sector?	Ex : tendencies to monopolies
	Impact on trust in public institutions ?	Institutional conflicts, ability of democratic practices to operate
	Impact on public budget used in regulatory framework ?	Via necessity to regulate agriculture if the innovation is allowed(coexistence; labelling, traceability, ...)
	Impact on need for traceability and complexity in system ?	Via the need for eventual control procedures..
<b>Research</b>	Impact on research orientations ?	Via (1) independence of research insitutions (2) new forms of public-private partnerships (2) use of research funds & skills (investment in GM research may undermine research on alternative options (= 'opportunity costs' : cost of not investigating other options )
<b>Necessity?</b>	Is the innovation necessary compared to status-quo?	
<b>Ethics</b>	Is the innovation in accordance with our ethical concerns related to agriculture, food and society	Man's relation with nature : (1) in-principle objection (2) frontiers to transformation of living organisms (no cross of barriers of species : transgene from (un)related species)

<b>5. UNCERTAINTY &amp; IGNORANCE</b>		
<b>Effects not foreseen</b>	Risks, Positive and negative effects not foreseen	
<b>Scientific knowledge of the crop and its biology</b>	Is the scientific basis for this innovation sufficient to allow its commercialization ?	
<b>6. LONG-TERM, CUMULATIVE EFFECTS</b>		
<b>ENVIRONMENT</b>	Impact on broad environmental change due to agricultural production?	
<b>AGRICULTURE</b>	Long-term, cumulative impacts : Does the innovation/strategy induce a move towards a truly sustainable agriculture?	
	(1) Does the strategy induce a move towards sustainable pest management ?	Ex : (1) Risk of new forms of pathogens to control (recombination of viruses and bacteria to produce new pathogens)? (2) Diminution of agroecosystem complexity (inhibit use of certain rotations and polycultures)
	(2) Does the strategy reinforces current model of agriculture and delays a greater reconversion of agricultural systems towards sustainability (agro-environmental dimensions)?	
	(3) Does the innovation/strategy induce a move towards a truly sustainable agriculture (socio-economical dimensions)?	
<b>AGRO-FOOD CHAIN</b>	Long-term, cumulative impacts (broader socio-economical change due to agriculture)	
	Does the innovation/strategy induce a move towards a truly sustainable agro-food chain/food consumption ?	
<b>SOCIETY</b>	Long-term change on development ?	Is it part of a (un)desirable trend ?
	Impact on the eventual irreversibility of our socio-economic development ?	increase / decrease / no effect on irreversibility
<b>7. VARIED</b>		
<b>Side effects</b>	Do the advantages of innovation/strategy outweigh drawbacks/side-effects ?	
<b>Other advantages</b>	Does the innovation/strategy has positive effects on other problems than the original ?	new opportunities ?
<b>Feasibility of the innovation/strategy</b>	Does the innovation/strategy needs great changes in the system (agricultural practices, investments, agro-food chain, ...) ?	

## **6. Suggestions complémentaires. Intégration de l'évaluation systémique de la pertinence dans les procédures réglementaires et dans la politique scientifique**

---

### **6. Further suggestions : Integration of systemic relevance assessment in regulatory procedures and in research policy)**

Cette partie dépasse le cahier de charges du projet. Nous l'estimons cependant comme partie intégrante de la recherche menée. L'action publique est, en effet, peu aidée par les longs rapports scientifiques discutant des aspects techniques mais ne proposant pas d'avis pour les politiques publiques (Van Parijs, 2004). Nous avons décidé de nous mouiller et de proposer des conclusions « pour l'action publique ». Nous sommes cependant conscients des limites de cet exercice réalisé sans itérations : ces propositions gagnent à être discutées avec d'autres chercheurs, des acteurs des filières et les fonctionnaires concernés.

Cette partie complémentaire est rédigée en anglais, langue d'usage dans les administrations qui gèrent, en Belgique et à l'étranger, les questions relatives aux plantes transgéniques, et dans les milieux scientifiques. Les sections 1 et 2 discutent des possibilités d'intégrer une approche d'évaluation systémique de la pertinence des plantes transgéniques au sein des procédures réglementaires existantes (section 1) et au sein du processus d'innovation (section 2.). La section 3 synthétise quelques propositions pour une politique scientifique qui prennent en compte l'ensemble des enjeux concernés par les plantes transgéniques selon une approche systémique de ceux-ci.

#### **6.1. Intégration dans les procédures réglementaires comme le protocole de Cartagena ou la Directive 2001/18?**

##### **6.1. Systemic relevance assessment within regulatory procedures such as the Cartagena Protocol and the EU Directive 2001/18?**

The integration of various socio-economic aspects within regulatory procedures of the Cartagena Protocol or the EU directive 2001/18 is rather difficult. It seems that the only way by which one can currently take into account such aspects is the general concept of coexistence between conventional, organic and transgenic crops.

If the consideration for coexistence is limited to coexistence "in the fields", cases for which socio-economic considerations could be used to oppose the introduction of transgenic crops will be restricted to plants for which gene flow is an important problem.

If coexistence is understood at the food chain level, then one could dismiss transgenic plants, for example, if this will have major consequences on the coexistence of these various food chains.

If one takes into account direct as well as indirect effects, short-term as well as long-term impacts, the systems analysis gives a stronger theoretical ground to eventual objections to transgenic crops as various positive and negative impacts can be balanced. Direct impacts of technology adoption can for example include increased economic benefit for farmers and reduction of pesticide use but indirect impacts may include increased monopolies in the agro-food and seed sector ; putting at stake farmers autonomy and regional agro-biodiversity ; induce a scientific and commercial under-development of alternative agricultural innovations that could prove to be better strategies in the long run

(Vanloqueren,2005) and thus delay a broader shift to real sustainable agricultural practices (Lewis W.J., et al.,1997; Levidow, 2000).

Most important, systems analysis is here used as a general approach to draw the attention on unexplored aspects (such as technological choice or the complex intertwinage between technical and socio-economical aspects); to gather information on all aspects concerned by a particular innovation, and to build tools that could be used in decision-making and procedures. We assume that the final decision is a political one, and that it is right that it is so. The scientists, in our view, is giving advice and suggestion of decisions but the final decision is in no case a scientific one.

Including a comparative systemic relevance assessment within regulatory procedures such as the Cartagena Protocol is a political decision (and challenge). This report has given evidence that it was a worthwhile effort and that the implementation of such an assessment is difficult but possible.

## **6.2. L'analyse systémique de la pertinence & le système d'innovation large**

### **6.2 Systemic relevance assessment in the broader innovation process**

Considering the difficulties to changing international treaties and protocols, we focus on other levels of decision-making for which our approach may be useful. We believe that our systems approach can be best implemented in decisions within the broader innovation process, from the beginning : the choice of innovation pathways in which a society/region/country invests.

It could be used :

- within research policy and research guidance or funding institutions as a tool to explore the different innovation pathways that may solve different problems we face or objectives we aim to reach such as climate change, pesticide reduction, etc. (Our last section focus exclusively on research policy)
- within the initial elaboration of research programs by scientists themselves, within research institutions. It could be imagined that large research departments, centres or networks would be encouraged to go for a reflexive period on the relevance of their research program before actually implementing it. This kind of approach which includes a debate with the society on research is gaining power in the several research fields and countries (Wilsdon et al., 2005; Nature editorial, 2004) and is intended to be a continued process during a research program. As an example, our method could be used as a preliminary method within the procedure used by INRA (Bertrand et al., 2004), with the objective to producing a report that would be a tool to "lay the ground" and give synthetic information on the different dimensions of the problem to all stakeholders before a general debate between them. This would be an improvement of their approach as one great difficulty when debating complex matters between persons of varying backgrounds is the fact that each person possess the knowledge and experience of only a few parts of the system at stake and that the learning process can consequently take a long time. The use of a report based on our systemic relevance assessment may allow to save time in this preliminary debate et could allow for a more thorough participatory procedures on technology choice, suggestions of public policies and research programs, all difficult and time-consuming steps that surrent projects have not addressed due to lack of time.
- as a tool to frame stakeholder/public participation processes or as a tool to improve understanding on stakes around agricultural innovation within general media and broader science communication, for a better cover of agricultural innovation, including controversial GMOs. During a GMO-discussion day, it was recognized by a representative from a consumer

organization that the systemic relevance assessment would be an useful for a better public debate (Schiffino and Vanloqueren, 2005).

### **6.3. Implications pour la Politique Scientifique : suggestions pour un effort de recherché multidisciplinaire, prospectif et systémique sur les plantes transgéniques**

#### **6.3. Implications for Research Policy : Short suggestions for a comprehensive, prospective and multidisciplinary research effort on transgenic plants**

The research projects we have done in our unit since 2003 lead us to believe that a greater importance to innovation assessment – compared to strict innovation development- within research would be worthwhile to increase the “public value of science” (Wilsdon et al., 2005). We share these suggestions here below with the prime objective to discuss them with other colleagues and stakeholders of research policy in Belgium. This part is thus not a “finite product” or a “ready-to-use package” but a first contribution to policy decision-making based upon our experience.

##### **6.3.1. Une approche multidisciplinaire et prospective des plantes transgéniques**

##### **6.3.1 A prospective & multidisciplinary approach of transgenic plants**

There are four good reasons to launch important research efforts within the Federal Research Policy to study the development of transgenic crops :

- First, transgenic plants are the focus of a **large public disagreement** within the entire European continent (Eurobarometer). This public opposition is not a black/white opinion, as in-depth studies prove it (Marris and et al, 2002) and the development of a technology without the trust and support the population undermines democracy and public confidence in science, which is the opposite objective of a science policy.
- Transgenic plants are mainly developed by the private sector, and within the private sector by foreign multinational corporations. However, the scientific basis for the development of transgenic plants, such as molecular biology, have been and still are largely developed in public research institutions. **Public funds** are in stake and public institutions have thus a responsibility in the development, use and assessment of these innovations.
- The development of transgenic crops is rapid and global and the **impacts, advantages and drawbacks, will be large**. Within agriculture, it is one of the innovations that spread faster than all others in the recent past. Consequences on farming, agro-food chains, the environment and the society may be large if transgenic crops are approved and developed in Europe. They will induce changes in these sectors and these changes have been weakly studied comparing to the research efforts given to molecular biology developments or even for gene flow assessments.
- Research on transgenic crops are mainly within the hands of « hard science » scientists (molecular biologists, plant breeders...) as agricultural research is mainly financed by the Regions, which focus on applied science and academic-private firms partnerships, or by the FNRS-FRIA in the Communauté Française, which focus on experimental (reductionnist) research with rare exceptions. We believe the same occurs in Flanders. As the impacts will influence the socio-economical sphere as well as the agro-environmental sphere, current research is not sufficient to challenge public knowledge on these. A comprehensive research agenda which would be *supra* specific economic or academic interests is needed.

The Federal Research Policy is thus the key actor to support a prospective and multidisciplinary approach of the potential development of transgenic crops, as it can adopt a broader view englobing the agro-food sector concerns but also the wills and interests of the entire society. As the controversy

on transgenic plants is still high and the public interest for agriculture and food has arisen due to these new biotechnologies as well as due to food crisis, there is a political momentum for such an innovative research program<sup>1</sup>.

Following our experience and our point of view -but this should be discussed with many other concerned researchers and actors- this approach could follow a few **guidelines**. Research topics for each of these guidelines are described further.

### **6.3.2. Suggestions des principes**

#### **6.3.2 Suggestions of guidelines**

##### **1) Follow a four-step general framework :**

Hails, in a paper published in Nature in 2003, suggested an broad four-step assessment of transgenic crops. The four main questions here below can indeed be an interesting framework for a research program on transgenic crops and agricultural innovations:

- 1) Answer the question *“What are the objectives ?”* The current approach is to study the risks of existing innovations. The starting point of the comprehensive program should be to answer the question : *“what are our objectives for agriculture, for food and fibres production ?”* so scientists can have a basis to start assess the innovations, such as transgenic plants.
- 2) Answer the question *“What are the different routes than can lead to these objectives”*. Transgenic plants (and their advantages and drawbacks) can thus only be assessed during a second step. To be fair with the reality, choices have to remain open : transgenic plants should be considered as one type of innovations among other types of innovations, that should be equally assessed. How do we assess these innovations (what criteria, methods and who can do this assessment?) is open to various approaches. We have suggested one but other may be as valuable.
- 3) Answer the question *“What is the cost of status quo ?”* To address the public concerns on GMOs, research should also focus on the challenges that agriculture and society would face in the hypothesis of a complete ban of transgenic crops.
- 4) Answer the question *“How to implement the desired changes”*. Finally, the program would eventually lead to advices for public policies concerning transgenic plants and agriculture. The focus would be on *“How to favour the development pathways that we want to favour in order to reach the goals we have chosen?”* *“How to implement the new public policies that are needed to challenge the development of transgenic plants and the transition to a sustainable agriculture?”*

##### **2) Combine reductionnist AND systemic approaches within multidisciplinary project teams.**

Reductionistic approaches are very efficient to produces results/answers for specific points of interests. However, these results may be inappropriate to be used by public authorities. Systemic approaches, as well as social sciences, produce ‘weaker’ results but, adopting a wider and open view, bring complementary results which may be of great interest for public authorities. The combination of both is necessary to fill the gap between scientific knowledge and public action.

##### **3) Adopt scenarios approaches.** Scenarios of possible pathways of technological developments should be studied. Short term (5 years) and long-term perspective (15 –25 years) need to be tackled. The potential achievements in each development pathway within these time scales would also be evaluated.

---

<sup>1</sup> This explains that our suggestions focus on innovations that concern agriculture and food production, but transgenic plants producing industrial matters, pharmaceutical products, as well as transgenic animals should also be studied.

- 4) **Build wider research-society interactions** : research networks (agricultural scientists, molecular biologists, economists, sociologists and political scientists) are classical ways of interacting within research programs. However, a deeper integration of stakeholders and citizens could produce better research if their integration is wider than presence in committees. A few scientists in Belgium have a large experience of this kind of science-society interactions and this public participation in research proving efficient in a growing number of cases. As agricultural innovations are concerned, stakeholders should include the agri-food chain sector, concerned public interest groups and citizens (participatory processes).

Examples of specific topics for 2nd step in Guideline #1

- compare research efforts in molecular biology and other non-transgenic pathways of innovation that could benefit Belgium (such as innovations in biological control of crop pests).
- Study the obstacles to these two pathways of innovation (once the innovations gets out of the lab) and identify the changes needed to accelerate the development of all innovations that have a great potential for our objectives
  - o do citizens trust some innovations better than others ? which ones ?
  - o are certain type of innovations linked to a certain type of socio-eco development pathway ?
- study the potential of non-technological innovations. A few (and often small) innovative quality food chains projects have emerged in the past (GAWL,...) : what are the advantages and drawbacks of these institutional innovations ?
- What innovations should Belgium push forward if obstacles to transgenic crops remain? (take into account new changes in common agricultural policy).

### 6.3.3. *Autres sujets de recherché particuliers*

#### 6.3.3 *ther specific topics of research*

- Focus on 4 important challenges : 1) pesticide reduction 2) food quality 3) industrial uses of agricultural crops and 4) climate change impacts on agriculture. A few case studies could be launched on specific transgenic plants that fit within the four main technical issues around transgenic plants : GMOs & pesticides reduction (herbicide-tolerant, insect-resistant and disease-resistant plants) ; GMOs & food quality (modification of composition of plants); GMOs & industry (plants for industry, such as modified oilseed rape or bioplastics) ; and GMOs & climate change (agriculture and global warming : drought-resistant plants are they the solution ?) For this last subject, the main scientific questions would be : *What will be the effects of global climate change ? Are adaptations of farming systems needed ? which role can improved varieties play ? what are the other innovations in which research funds could be invested ?*
- GMOs and SCIENTISTS ATTITUDES : do scientists have a neutral attitude towards transgenic plants in their discourse and research or do they push certain innovation pathways ? How do they assess their advantages and drawbacks? How do they choose to work on one innovation pathway rather than the other ?
- PLANT BREEDING METHODS : a scientific forum on plant breeding methods could be organized to address issues such as : what are the new opportunities offered by transgenesis specifically, compared to classical breeding schemes and marker-assisted breeding ? What is specific to transgenic plants ?
- OPEN-SOURCE GMOs : What would be the differences for food chains and citizens if transgenic plants are developed in an open-source approach (no patents) ?

The comparison between alternative innovation scenarios may seem unnecessary in classical regulatory procedure. Current assessments indeed do not include such dimensions, as they are framed with an unique objective: assess the “safeness” of the innovation in question, test the absence of risks. We challenge this restricted framing of the assessment for several reasons (Vanloqueren and Baret 2004b). Conversely, it could be conceivable that a public authority reject an innovation because it is contrary to its public objectives (such as agricultural policies, sustainable development goals, protection of farmers against dependence upon monopolies within seed and agro-chemical sectors,...), contrary to ethical choices or even because other alternative innovations that have a comparable or better potential already exist or will be developed in the near future. These kinds of decisions would be highly political but we assume all are.

## Bibliographie

- Aalbers P, 1999. Besparen fungiciden mogelijk zonder toename schurft. *Fruitteelt*, v. 8, p. 1-13.
- Agrenwal Asbl, 2002. Agri-environnement en Wallonie. Eaux, biodiversité, paysage. Agriculture et plantations de maïs. Les cahiers de l'agriculture 32. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale de l'Agriculture.
- Agrenwal Asbl, 2005. Fiches Techniques. 7a. Localisation des herbicides et désherbage mécanique en maïs.
- Alavanja, M. C. R., Samanic, C., Dosemeci, M., Lubin, J., Tarone, R., Lynch, C. F., Knott, C., Thomas, K., Hoppin, J. A., Barker, J., Coble, J., Sandler, D. P., and Blair, A., 2003, Use of agricultural pesticides and prostate cancer risk in the agricultural health study cohort: *American Journal of Epidemiology*, v. 157, p. 800-814.
- Altieri, M. A., 2000. The ecological impacts of transgenic crops on agroecosystem health: *Ecosystem Health*, v. 6, p. 13-23.
- Anonyme, 1999. Het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen bij de productie van pitfruit. *Belg.Fruitrev.*, v. 7, p. 10-25.
- Anonyme, 2005. Fiche conseil: les tunnels et les cultures sous-plastiques. *Plantes et Jardins*. [http://www.plantes-et-jardins.com/magazine/fiches/fiche.asp?id\\_fiche=60](http://www.plantes-et-jardins.com/magazine/fiches/fiche.asp?id_fiche=60)
- Asher M.J.C., 1999. Sugar-beet rhizomania : the spread of a soilborne disease. *Microbiology Today*, v. 26, p. 120-122.
- Asher M.J.C. and Kerr H., 1996. Rhizomania: Progress with resistant varieties. *Brit.Sugar*, v. 64, p. 19-22.
- Barberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research*, v. 42, p. 177-193.
- Barnes, J. P. and Putnam, A. R., 1983. Rye residues contribute weed suppression in no-tillage cropping systems: *Journal of Chemical Ecology (Historical Archive)*, v. 9, p. 1045-1057.
- Beekman, V., 2004. Description of Ethical Bio-Technology Assessment Tools for Agriculture and Food Production Interim Report Ethical Bio-TA Tools (QLG6-CT-2002-02594).
- Belgian Biosafety Server, 2004. Site de Belgian Biosafety Server. <http://www.biosafety.be>.
- Benbrook C.M., 2004. Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States: the first nine years. *Biotech InfoNet*. Technical paper number 7.
- Bertrand, A., Joly, P. B., and Marris, C., 2004. Mettre les choix scientifiques et techniques en débat : l'expérience d'"évaluation technologique interactive" des recherches sur les OGM-vignes à l'INRA : *INRA Sciences Sociales*, v. n° 1/04 - Juin 2004.
- Bhowmick P.C. and Inderijt, 2003. Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management. *Crop Protection*, v. 22, p. 661-671.

- Biancardi, E., Lewellen, R. T., De Biaggi, M., Erichsen, A. W., and Stevanato, P., 2002. The origin of rhizomania resistance in sugar beet: *Euphytica*, v. 127, p. 383-397.
- Bioforum Wallonie, 2005. Situation de l'agriculture biologique en Belgique et en Wallonie Situation actuelle du secteur bio en terme de superficies et nombre d'exploitations agricoles (année 1999-2003). <http://www.bioforum.be/fr/news/statistiques.htm>
- Blanchet A. and Gotman A., 2001. L'enquête et ses méthodes: l'entretien. Collection sociologie, Nathan Université, 40 p.
- Bonami M., 1996. Management des systèmes complexes. Pensée systématique et intervention dans les organisations.: 1-272 p.
- Bond W. and Grundy A.C., 2001. Non chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*, v. 41, p. 383-405.
- Bongiovanni G.C. and Lanzoni L., 1964. La rizomania della bietola.: *Progresso Agricolo*, v. 2, p. 209-220.
- Bonny, S., Les OGM risquent-ils d'accroître la dépendance de l'agriculture vis-à-vis de l'industrie ? papier du site INRA "Les OGM à l'INRA" .
- Boschaert L. and Muermans L., 2001. Filière Grandes Cultures - Rapport annuel 2000. <http://www.securitealimentaire.org/grcult.pdf>
- Bosshart, E., Siegfried, W., and Schüepp, H., 1987. Concepts and methods in biological control of diseases in apple orchards: *Bulletin OEPP*, v. 17, p. 655-663.
- Braibant M. 2004. Evaluation systémique de la pertinence de la betterave transgénique résistante à la rhizomanie. 1-101. Mémoire pour le diplôme de Bio-ingénieur. UCL, faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnemental.
- Brichart, 2005. Prix des fongicides contre la tavelure. Communication personnelle
- Bus V. and Gardiner S., 1998, Pest and disease Resistance in Apple: I sources of genetic resistance: *The orchardist*, v. June 1998.
- Buttner, G., Marlander, B., and Manthey, R., 1995, Breeding for Resistance to Rhizomania in Sugar-Beet (*Beta-Vulgaris* L): *Plant Breeding*, v. 114, p. 160-164.
- CARAB asbl, 2005. Asbl CARAB, spécialisée dans les actions de soutien technique à l'agriculture biologique professionnelle en Wallonie. <http://users.swing.be/carab/>
- Carr, S. and Levidow, L., 2000. Exploring the links between science, risk, uncertainty, and ethics in regulatory controversies about genetically modified crops: *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, v. 12, p. 29-39.
- Checkland, P. B., 1981. *Systems Thinking, Systems Practice*: New York, John Wiley.
- Chesson A. and Flachowsky G., 2003. Transgenic plants in poultry nutrition. *World's Poultry Science Journal*, v. 59, p. 201-207.

- Chevalier M., Lespinasse Y., and Renaudin S., 1991. A microscopic study of the different classes of symptoms coded by the *Vf* gene in apple for resistance to scab (*Venturia inaequalis*): *Plant Pathology*, v. 40, p. 256.
- Chevassus-au-Louis, B., 2001. OGM et Agriculture : options pour l'action publique.
- Chevassus-au-Louis, B., 2002. OGM et agriculture : options pour l'action publique. Rapport du groupe preside par B. Chevassus-au-Louis : Marie-Pierre Arlot, Stephane Le Bouler, Philippe Le Lourd (Eds.) La Documentation française, 2002, Paris, 393 p: *Nature Sciences Societes*, v. 10, p. 107-108.
- Chiapusio G., Gallet C., Dobremez J.-F., and Pellissier F., 2002. Composés allélopathiques: herbicides de demain? *Biopesticides d'origine végétale*, Edition Tec & Doc.Lavoisier.
- Clark, B., Fontes, E. M. G., and Dale, P. J., 2002. Potential for the environmental impact of transgenic crops: *Nature Biotechnology*, v. 20, p. 567-574.
- Cobb A.H. and Kirkswood R.C., 2002. *Herbicides and their mechanisms of action*. Sheffield Academic Press. CRC Press. Edition 2002.
- Comstock, G., 2004. *Ethics and Genetically Modified Crops: Science, Ethics and Society*. 5th Congress of the European Society for Agricultural and Food Ethics. Preprints.
- Confédération des betteraviers Belges (CBB), 2003. *Accords interprofessionnels: Secteur Betteraves-sucré*. CBB, (in press).
- Confédération des betteraviers Belges (CBB), 2005. C.B.B:Confédération des Betteraviers Belges. <http://www.valbiom.be/pages/popup/POP%20UP%20Membres/membrecbb.htm>
- Cooke, S., 2003. Comments on "The Costs and Benefits of Genetically Modified (GM) Crops – Scoping Note" issued by the Prime Minister's Strategy Unit on 25 September 2002 from Sally Cooke.
- Creemers P. 2003. Communication personnelle
- Creemers P., 1998. Un nouveau défi pour une lutte rationnelle contre la tavelure: la flexibilité. *Fruit Belge*, v. 472, p. 57-63.
- Creemers P., 2000. Terug een jaar met schurftprobleem. *Fruitteelt Nieuws*, v. 18, p. 25-28.
- Crosby, J. A., Janick, J., Pecknold, P. C., Korban, S. S., Oconnor, P. A., Ries, S. M., Goffreda, J., and Voordeckers, A., 1992. Breeding Apples for Scab Resistance - 1945-1990: *Fruit Varieties Journal*, v. 46, p. 145-166.
- Decoin M., 1997. La rhizomanie de la betterave: Génétique contre racines folles.: *Phytoma- La défense des végétaux*, v. 491, p. 28-30.
- Deschomets G (Monsanto), 2001, Les adjuvants du glyphosate. *Phytoma-Défense des végétaux*, v. 541, p. 14-16.
- Direction Générale Santé et protection des Consommateurs: DG sanco, 2004. *Contrôle des résidus de pesticides dans les produits d'origine végétale dans l'Union européenne, en Norvège, en Islande et au Liechtenstein -Rapport 2002 - Résumé*.

- Division des renseignements de la Direction de l'industrie des produits végétaux, agriculture Canada, 1993. Document des décisions-E93-01: Myclobutanil.  
[http://www.pmraarla.gc.ca/francais/pdf/rdd/rdd\\_e9301-f.pdf](http://www.pmraarla.gc.ca/francais/pdf/rdd/rdd_e9301-f.pdf)
- Duke, S. O., 2005. Taking stock of herbicide-resistant crops ten years after introduction: Pest Management Science, v. 61, p. 211-218.
- Duquenne F.-X., 2002. Les scientifiques traquent le virus P. Le Betteravier Français, v. 794, p. 17.
- Duval J, 1992. La tavelure de la pomme. Projet pour une agriculture écologique.  
[www.eap.mcgill.ca/Agrobio/ab\\_foot.htm](http://www.eap.mcgill.ca/Agrobio/ab_foot.htm)
- Ervin, D. E., Welsh, R., Batie, S. S., and Carpentier, C. L., 2003, Towards an ecological systems approach in public research for environmental regulation of transgenic crops: Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 99, p. 1-14.
- EU Presidency 2004 and 2005. Socio-economic considerations. Draft EU position paper (EU 2004 Presidency by The Netherlands).
- European Commission, 2001. Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council of 12 March 2001 on the Deliberate Release into the Environment of Genetically Modified Organisms and Repealing Council Directive 90/220/EEC, *Official Journal* L 106(17.4) (2001), 1-38.
- European Science and Technology Observatory, 2003. Review of GMOs under research and development and in the pipeline in UE. March 2003.
- Fiasse J., 2005. Evaluation systémique de la pertinence du maïs transgénique RR suite à l'interdiction de l'atrazine. Mémoire pour le diplôme de Bio-ingénieur. Unité de génétique, faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, UCL.
- Foucart G., Mazy J.-P., and Renard F., 2004. Conseils de printemps en culture de maïs. CIPF.
- Foucart G., Mazy J.-P., and Renard F., 2005. Conseils de printemps en culture de maïs. CIPF.
- Franc G., Kerr E., Brown W., and Riesselman J., 1993. Rhizomania of Sugar Beet.  
<http://www.sbreb.org/brochures/wyoming/wyoming.htm>
- Fytoweb, 2005. Site qui répertorie les agrégations des produits phytopharmaceutiques.  
<http://www.phytoweb.fgov.be/indexFr.asp>
- GAWI, 2001. Site Internet du GAWI. <http://www.asblgawi.com/fgaw.html>
- Genetic Engineering Newsletter, 2002. Transgenic plants in viticulture and fruit growing. [Special Issue 9/10 (October 2002)], 14. Oko-Institut e.V.- Institute for Applied Ecology.
- Gilliver K., 1947. The effect of plant extracts on the germination of the conidia of *Venturia inaequalis*: *Ann.Appl.Biol.*, v. 34, p. 136-143.
- Giltrap, N., Baker R., and Henry C., 2001. Sugar Beet Rhizomania-a technical overview. Technical briefing.: Central Science Laboratory (CSL) York.
- Giraud M., Gendrier J-P, Orts R., and Baudry O., 1996. Protection intégrée Pommier-Poirier: CITFL, 23-27 p.

- Goffart and Maraite H., 1991. Facteurs édaphiques et phytotechniques affectant le potentiel infectieux de *Polymyxa betae* Keskin en Belgique: *Parasitica*, v. 47, p. 165-192.
- Grosjean E, 1999. Evaluation Agronomique des Mesures Agri-Environnemental. Etude commandée par le GIREA. Document fourni par Thierry Walot, du Girea, ECOL, UCL.: Rapport scientifique final. EVAGRI.
- Gupta G.K., 1987. Investigations on the effect of urea and fungicides in suppressing the ascigerous stage of apple scab pathogen: *International Journal of Tropical. Plant Disease*, v. 5, p. 93-97.
- Gustafson DI, 2002. Biotechnology insight. How biotech crops protect water quality? *ISB News Report*.
- Hails, R. S., 2002. Assessing the risks associated with new agricultural practices: *Nature*, v. 418, p. 685-688.
- Hamill A.S. and Zhang J., 1997. Rate and time of bentazone/atrazine applications for broadleaf weed control in corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, v. 11, p. 549-555.
- Hammond B., Duhdeh R., Lemon J., and Nemeth M., 2004. Results of a 13 weeks safety assurance study with rats fed grain from glyphosate tolerance corn. *Food and Chemical Toxicology*, v. 42, p. 1003-1014.
- Harju V. and Richard-Molard M., 2002. Rhizomania P type - a new threat to growers? *Brit.sugar Beet Rev.*, v. 70, p. 22-27.
- Harveson R. and Rush C.M., 1994. Evaluation of fumigation and rhizomania-tolerant cultivars for control of a root disease complex of sugar beets. *Plant Disease*, v. 78, p. 1197-1202.
- Hatcher P.E. and Melander B., 2003. Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non chemical weed management strategies. *Weed Research*, v. 43, p. 303-322.
- Henry, C. M., Bell, G. J., and Hill, S. A., 1992. The Effect of Methyl-Bromide Fumigation on Rhizomania Inoculum in the Field. *Plant Pathology*, v. 41, p. 483-489.
- Hermann O., 2005, Pratiques actuelles de protection phytosanitaire en culture betteravière Belge. *Le Betteravier*, v. 413, p. 8-10.
- Hetherington PR, Reynolds TL, Marshall G, Kirkwood RC.,1999. The absorption, translocation and distribution of the herbicide glyphosate in maize expressing CP-4 gene. *Journal of Experimental Botany* 50 (339), p. 1567-1576.
- Hour T.C., Lin J.K., and Chen L, 1998. Comparative investigation on the mutagenicities of organophosphate, phthalimide, pyrethroid and carbamate insecticides by the Ames and lactam tests. *Mutagenesis*, v. 13, p. 157-166.
- Hubbell B.J., 1998, Transgenic crops: Engineering a more sustainable agriculture?: *Agriculture and Human Values*, v. 15, p. 43-56.
- Hyun Y., Bressner G.E., Ellis M., Lewis A.J., Fischer R., Staniesiewski E.P., and Hartnell G.F., 2004. Performance of growinf-finishing pigs fed diets containing Roundup Ready Cron (event nk 603), a non transgenic genetically similar corn, or conventional corn lines. *Journal of Animal Science*, v. 82, p. 571-580.

- Ingeborg, A. M. and Traavik, T., 2003. Sustainable Development and Norwegian Genetic Engineering Regulations: Applications, Impacts, and Challenges. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, v. 16 (4): 317-335, 2003.
- INRA: Institut National de la recherche agronomique- France .2004. Site de l'Inra. <http://www.inra.fr>
- Institut National de Statistiques, 2004. Recensement agricole de 2004. [http://statbel.fgov.be/pub/home\\_fr.asp?x=13&y=1](http://statbel.fgov.be/pub/home_fr.asp?x=13&y=1)
- Institut National de Statistiques, 2005. Horticulture: cultures fruitières en plein air (1999-2004). <http://statbel.fgov.be>
- Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave (IRBAB), 2004. Site de l'IRBAB. <http://www.irbab.be>
- Institut Royal Belge pour l'amélioration de la betterave (IRBAB), 2005, Quelle variétés pour 2005 ? Le Betteravier, v. 413 Numéro spécial, Février 2005, p. 15-20.
- Institut Technique Français de la betterave industrielle, ITB, 2002. Variétés tolérantes à la rhizomanie - Résultats des essais 2002 en champ avec rhizomanie - Conseils pour 2003. *Le Betteravier Français*, v. 796, p. 23-27.
- International Council for Science (ICSU), 2003. *New Genetics, Food and Agriculture. Scientific Discoveries - Societal Dilemmas*. -56 pp.
- Ison, R. L., Maiteny, P. T., and Carr, S., 1997. Systems methodologies for sustainable natural resources research and development: *Agricultural Systems*, v. 55, p. 257-272.
- ITAB and GRAB, 2002. Produire des fruits en agriculture biologique: p62 p.
- Janssens L., 2003. OGM et production biologique. *Bioforum*. <http://www.ecocert.be/pdf/OGMfr.pdf>
- Joint Research Centre, 2004. Site d'informations sur les biotechnologies et les OGM réalisé par le Joint Research Centre de la Commission Européenne. <http://gmoinfo.jrc.it>
- Joly, P. B., 2003, La gestion d'une innovation controversée : l'exemple des biotechnologies végétales.
- Karlsson, M., 2003. Ethics of sustainable development. A study of swedish regulations for genetically modified organisms. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, v. 16: 51-62, 2003.
- Keuler and Gessier, 1985 . *Vergers polyvariétaux*. Colloque ISHS.
- Knezevic S.Z., 2002. Use of herbicide tolerant crops as a component of an integrated weed management program. University of Nebraska Cooperative Extension.
- Kruse, M., Koenig, R., Hoffmann, A., Kaufmann, A., Commandeur, U., Solovyev, A. G., Savenkov, I., and Burgermeister, W., 1994, Restriction-Fragment-Length-Polymorphism Analysis of Reverse Transcription Pcr Products Reveals the Existence of 2 Major Strain Groups of Beet Necrotic Yellow Vein Virus: *Journal of General Virology*, v. 75, p. 1835-1842.
- Kuc J., Barnes E., Daftsios A., and Williams E., 1959, The effect of amino acids on susceptibility of apple varieties to scab.: *Phytopathology*, v. 49, p. 313-315.
- Kudsk, P. and Streibig, J. C., 2003, Herbicides - a two-edged sword: *Weed Research*, v. 43, p. 90-102.

- KWS France, 1997, Livret Technique 1-Rhizomanie: 28 p.
- KWS France, 2002, Les dossiers KWS: Rhizomanie: 0-44 p.
- Lacy, W. B. and Busch, L., 1991. The fourth criterion Social and Economic impacts of agricultural biotechnology in NABC Report 3.
- Lamotte P., 2005. Agriculture: le goût amer du sucre: Le vif express, v. 30 septembre-6 octobre 2005.
- Lateur M., Lespinasse Y., Lefrancq B., Pinet Cl., Laurens F, Durel CE., and Parisi L., 2000, D.A.R.E.: un projet européen sur la résistance durable du pommier à la tavelure et à l'oïdium. Fruit Belges, v. 488, p. 189-195.
- Lateur, M., 2002, Perspectives de lutte contre les maladies des arbres fruitiers à pépin au moyen de substances naturelles inductrices d'une résistance systémique. Biotechnol.Agron.Soc.Envir., v. 6, p. 67-77.
- Lateur, M. and Populer, C., 1994, Screening Fruit Tree Genetic-Resources in Belgium for Disease Resistance and Other Desirable Characters: Euphytica, v. 77, p. 147-153.
- Lauber E., Janssens L., Weyens G., Jonard G., Richard KE., Lefevre M., and Guilley H., 2001, Rapid screening for dominant negative mutations in the *beet necrotic yellow vein virus* triple gene block proteins P13 and P15 using a viral replicon.: Transgenic research, v. 10, p. 293-302.
- Le Monde, 13 mars 2005. Le Roundup n'intoxique pas que les mauvaises herbes. <http://www.lemonde.fr/web/article>
- Ledent JF, 2003, Cours d'Ecophysiologie et phytotechnie des cultures tempérées: points de repères en phytotechnie spéciale: ref Syllabus.
- Lespinasse et al., 1999. D.A.R.E., un projet européen coordonné par l'INRA d'Angers.: Phytoma - La défense des Végétaux, v. 514, mars 1999.
- Levidow, L., 2000, Genetically modified organisms: When culture determines the laws: Biofutur, v. 2000, p. 42-47.
- Lewis W.J., Van Tereren J.C., and Phatak, S. C., 1997, A total system approach to sustainable pest management: Proc Nat Aca Sc, v. 94, p. 12243-12248.
- Liebman M. and Davis A.S., 2000, Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. Weed Research, v. 40, p. 27-47.
- Magein H., 2002 Rétrospective de l'évolution de la revue "Le Fruit Belge" dans son contexte pomologique. Le Fruit Belge 500, Nov-déc 2002, 177-183.
- Mahmood, T. and Rush, C. M., 1999, Evidence of cross-protection between beet soilborne mosaic virus and beet necrotic yellow vein virus in sugar beet: Plant Disease, v. 83, p. 521-526.
- Mannerlof, M., Lennerfors, B. L., and Tenning, P., 1996, Reduced titer of BNYVV in transgenic sugar beets expressing the BNYVV coat protein: Euphytica, v. 90, p. 293-299.
- Maraite H. Cours de Phytopathologie: Maladies causées par des champignons et des pseudochampignons. Cours de phytopathologie, 2.28-2.30. 1998. FYMY 2110.

- Marris, C. and et al., 2002. Public Perceptions of Agricultural Biotechnologies in Europe Final Report of the PABE research project.
- Martin F. and Whitney E., 1990. In bed fumigation for control of rhizomania of sugar beet.: *Plant Disease*, v. 74, p. 31-35.
- Mayer, S. and Stirling, A., 2002, Finding a Precautionary Approach to Technological Developments - Lessons for the Evaluation of GM Crops: *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, v. 15(1): 57-71; Jan 2002.
- Mazoyer, M. and Roudart, L., 2002. Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine.
- Mephram, B., 2000, A framework for the ethical analysis of novel foods: The ethical matrix: *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, v. 12, p. 165-176.
- Messermith C.G. and Adkins S.W., 1995, Integrating weed-feeding insects and herbicides for weed-control.: *Weed Technology*, v. 9, p. 199-208.
- Meulemans M., Janssens L., and Horemans S., 2003, Interactions between major genes, and influence of the genetic background in the expression of rhizomania resistance. First joint IIRB-ASSBT Congress, p. 161-173.
- Meunier A., Schmit J.-F., Stas A., Marlier A., Wauters A., Steyer S., and Bragard C., 2000. The status of rhizomania in Belgium. *Parasitica*, v. 56, p. 85-97.
- Miedtke U. and Kennel W., 1990, *Athelia bombacina* and *Chaetomium globosum* antagonists of the perfect stage of the apple scab (*Venturia inaequalis*) under field conditions: *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, v. 97, p. 24-32.
- Minister van Consumentenzaken, 2002. V. e. L. Kennisgeving B/BE/O2/V1 -weigering van toelating. Lettre à F. Krens (Plant Research International).
- Monsanto Company, 2002. Safety Assessment of Roundup Ready Corn event NK 603. [http://www.monsanto.com/monsanto/content/sci\\_tech/prod\\_safety/roundup\\_corn/pss\\_NK603.pdf](http://www.monsanto.com/monsanto/content/sci_tech/prod_safety/roundup_corn/pss_NK603.pdf)
- Morin H., 2005, Le Roundup n'intoxique par que les mauvaises herbes: *Le Monde*, v. 13 mars 2005.
- MRW, 2003. Tableau de bord de l'environnement wallon 2003. Ministère de la Région wallonne, Direction générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement. <http://environnement.wallonie.be/eeew/>.
- MRW, 2004. Tableau de bord de l'environnement wallon 2004. Ministère de la Région wallonne, Direction générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement. <http://environnement.wallonie.be/eeew/>.
- MRW-DGA, 2005. Les subventions agri-environnementales instaurées par l'AGw du 28 octobre 2004.
- Nagabhushana G.G., Worsham A.D., and Yenish J.P., 2001, Allelopathic cover crops to reduce herbicide use in sustainable agricultural systems. *Allelopathy journal*, v. 8, p. 133-146.
- Nature editorial, 2004. Going public: *Nature*, v. 431, p. 883.

- Nihoul, P. and Mahieu, S., 2005. La sécurité alimentaire et la réglementation des OGM. Perspectives nationales, européenne et internationale. Bruxelles, Larcier, 1-348 p.
- Norsworthy J.K., 2004. Small-grain cover crop interaction with glyphosate-resistant corn (*Zea mays*): Weed Technology, v. 18, p. 52-59.
- Norsworthy J.K. and Frederick J.R., 2005. Integrated weed management strategies for maize (*Zea mays*) production on the southeastern coastal plains of North America.: Crop Protection, v. 24, p. 119-126.
- Ortega, F., Steiner, U., and Dehne, H. W., 1998. Induced resistance: a tool for fungicide resistance management: Pesticide Science, v. 53, p. 193-196.
- PAN Belgique Pesticide Action Network Belgium, 2005. Controverse autour du glyphosate. [http://www.pan-belgium.be/2\\_approfondir/glyphosate\\_pas\\_innocent\\_4.ht](http://www.pan-belgium.be/2_approfondir/glyphosate_pas_innocent_4.ht)
- PAN UK, 2005. Pesticide Action Network United Kingdom. Réseau pour la réduction de l'utilisation des pesticides. <http://www.pan-uk.org/>
- Paul, H., Henken, B., Scholten, O. E., and Lange, W., 1993. Use of Zoospores of *Polymyxa-Betae* in Screening Beet Seedlings for Resistance to Beet Necrotic Yellow Vein Virus: Netherlands Journal of Plant Pathology, v. 99, p. 151-160.
- Perry, J. N., Firbank, L. G., Champion, G. T., Clark, S. J., Heard, M. S., May, M. J., Hawes, C., Squire, G. R., Rothery, P., Woiwod, I. P., and Pidgeon, J. D., 2004. Ban on triazine herbicides likely to reduce but not negate relative benefits of GMHT maize cropping. Nature, v. 428, p. 313-316.
- Pesticide Action Network (non daté). Captane: Fiche technique de synthèse des études scientifiques et des classifications officielles de risque pour l'environnement et la santé humaine.
- Plant Research International, 2001. Kennisgeving van doelbewuste introductie van genetisch gemodificeerde organismen in het milieu. B/BE/02/V1 Titel: Toesting van genetisch gemodificeerde appelbomen met verhoogde schimmelresistentie.
- Populer C. and Lateur M., 1993. Sauvegarde et valorisation des ressources génétiques fruitières. Annales de Gembloux, v. 99, p. 97-107.
- Pouteau, S., 2000. Beyond Substantial Equivalence: Ethical Equivalence: Journal of Agricultural and Environmental Ethics, v. 13 (3-4): 273-291, 2000.
- Pretty, J., 2001. The rapid emergence of genetic modification in world agriculture: contested risks and benefits: Environmental Conservation, v. 28, p. 248-262.
- Proctor J.T., Blackburn W.J., Gillespie T.J., and MacNeil B.H., 1983. Prediction of apple scab: reduction of spraying: Highlights, v. 6, p. 7-9.
- Raffinerie Tirlémontoise, 2001. La Raffinerie Tirlémontoise ... et le sucre, produit de la nature. <http://www.tiensesuiker.com>
- Raffinerie Tirlémontoise, 2003. Site de la Raffinerie Tirlémontoise. <http://www.tiensesuiker.com>
- Rice E.L., 1984. Allelopathy: Academic press.

- Robinson, J., 1999. Ethics and transgenic crops. A review: *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 2, p. 71-81.
- Rush, C. M., 2003. Ecology and epidemiology of Benyviruses and plasmodiophorid vectors: *Annual Review of Phytopathology*, v. 41, p. 567-592.
- Sandrap, A., 2002. La consommation de fruits en Belgique.: *Le Fruit Belge*, v. 500 Novembre-Décembre 2002, p. 177-183.
- Sankula S. and Blumenthal E., 2004. Impacts on US agriculture of biotechnology-derived crops planted in 2003 - an update of eleven case studies. NCFAP. <http://www.ncfap.org/whatwedo/biotech-us.php>
- Schiffino, N. and Vanloqueren, G., 2005. Quelle gestion démocratique des OGM dans le cadre d'une politique de développement durable? Notes de synthèse, Journée de rencontre acteurs-chercheurs organisée par le Centre de recherche CITES, Chaire Tractebel-Environnement 2004-2005.
- Schlosser E., 1988. Epidemiology and management of *Polymyxa betae* and *beet necrotic yellow vein virus*.: *Applied Biology*, v. 2, p. 281-292.
- Schmit J.-F., Meunier A., Stas A., Legrève A, Bragard C., and Wauters A., 2002. Véritable explosion de la rhizomanie en 2002.: *Le Betteravier*, v. 388, p. 8-10.
- Scholten O. and Lange W., 2000. Breeding for resistance to rhizomania in sugarbeet: A review. *Euphytica*, v. 112, p. 219-231.
- Schut P., 2005. Sous-solage. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/glossary/subsoiling.html>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2000. Cartagena Protocol on Biosafety to the Convention on Biological Diversity. text and annexes. Montreal, Secretariat of the Convention on Biological Diversity.
- Sénat français, 2005. L'atrazine. <http://www.senat.fr/rap/102-215-2/102-215-246.html>
- Shaner D.L., 2000. The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management.: *Pest Management Science*, v. 56, p. 320-326.
- Sidhu R.S., Hammond B.G., Fuchs R.L., Mutz J.N., Holden L.R., George B., and Olson T., 2000. Glyphosate tolerant corn: the composition and feeding value of grain from glyphosate tolerant corn is equivalent to that of conventional corn (*Zea mays* L.): *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 48, p. 2305-2312.
- Stirling, A. and Mayer, S. 1999. Rethinking Risk: A Pilot Multi-Criteria Mapping of a Genetically Modified Crop in Agricultural Systems in the UK . SPRU, University of Sussex.
- Subel, 2005. Présentation de subel. <http://www.subel.be/emc.asp?pageId=2>
- Syngenta, 2004. Site de la firme semencière Syngenta Seeds. <http://www.syngentaseeds.fr>
- Syngenta, 2005. Managing glyphosate-resistant weeds. An investment in land value. [http://www.syngentacropprotection-us.com/resources/prod/touchdown/land\\_values.pdf](http://www.syngentacropprotection-us.com/resources/prod/touchdown/land_values.pdf)

- Tamada, T., 1999. Benyviruses. *Encyclopedia of Virology*, second ed., Vol. 11. GRANOFF, A. & WEBSTER, R. eds.: Academic Press New York, p. 15-160.
- Teasdale J.R., 1995. Influence of narrow row/high population corn (*Zea mays*) on weed control and light transmittance. *Weed Technology*, v. 9, p. 113-118.
- Trewavas, A., 1999. Much food, many problems *Nature*, v. 402, p. 231-232.
- Tuvelsson S., 2005. Avis de Syngenta sur les betteraves résistantes à la rhizomanie. Communication personnelle
- UNAB. 2005. Communication personnelle.
- Vanloqueren G, 2003. Le secteur de l'arboriculture fruitière face à l'innovation transgénique et à ses alternatives: le cas des pommiers résistants à la tavelure. 1-88. 2003. Fondation Universitaire Luxembourgeoise.
- Vanloqueren, G. (Unpublished), 2005. Evaluation prospective des impacts potentiels des blés transgéniques résistants à la fusariose. Rapport d'étude de cas.
- Vanloqueren G. and Baret, P. V., 2004a. Les pommiers transgéniques résistants à la tavelure. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, v. 52, p. 5-21.
- Vanloqueren, G. and Baret, P. V., 2004b. Systemic "relevance assessment" of transgenic crops: Bridging biotechnology regulations and sustainable development policies? *Science, Ethics and Society*. Proceedings of the 5th Congress of the European Society for Agricultural and Food Ethics, Leuven, Belgium, September 2-4, p. 160-164.
- Walsh L.P., McCormick C., Martin C., and Stocco D.M., 2000. Roundup inhibits steroidogenesis by disrupting steroidogenic acute regulatory (StAR) protein expression. *Environmental Health Perspectives*, v. 108, p. 769-776.
- Wauters A., 2004. Pourquoi choisir des variétés recommandées? *Le Betteravier*, v. 402, p. 15-22.
- Web-Agri, 2005. Site agricole français. <http://www.web-agri.fr/default.asp?idRub=242>
- Weiner J., Griepentrog H.W., and Kristensen L, 2001. Suppression of weeds by spring wheat *Triticum aestivum* increases with crop density and spatial uniformity. *Journal of Applied Ecology*, v. 38, p. 784-790.
- Wikipedia, the free encyclopedia, 2005. Metabolite. <http://en.wikipedia.org/wiki/Metabolite>.
- Williams, G. M., Kroes, R., and 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[49], 117-165, Elsevier Science.
- Wilsdon, W., Wynne, B., and Stilgoe, J., 2005. The Public Value of Science (or how to ensure that science really matters). 1-67. London, Demos.
- Wisler, G. C., Liu, H. Y., and Duffus, J. E., 1994. Beet Necrotic Yellow Vein Virus and Its Relationship to 8 Sugar-Beet Furo-Like Viruses from the United-States: *Plant Disease*, v. 78, p. 995-1001.

- Wolfenbarger, L. L., 2000. The ecological risks and benefits of genetically engineered plants. *Science*, v. 290(5499), 2088-93..
- World Resources Institute, 2005. Integrating socio-economic considerations into biosafety decisions. the role of public participation. WRI White Paper.
- Wu H., Pratley J., lemerle D., and Haig T., 1999. Crop cultivars with allelopathic capability. *Weed Research* ., v. 39, p. 171-180.