



Evaluation détaillée du maïs Bt

**Source: James, C. 2003. Global Review of Commercialized Transgenic Crops:
2002 Feature: Bt Maize. ISAAA Briefs No.29. ISAAA: Ithaca, NY**

*Les articles suivants sont extraits du chapitre 8 de la publication originale
de Clive James (2003).*

Evaluation détaillée du maïs Bt

**(Source: James, C. 2002. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2002 Feature: Bt Maize.
ISAAA Briefs No.29. ISAAA: Ithaca, NY.)**

Les articles suivants sont extraits du chapitre 8 de la publication originale de Clive James (2003).

Co-sponsors: L'ISAAA et la Fondation Rockefeller.

L'ISAAA remercie avec reconnaissance la Fondation Rockefeller pour son don qui a permis la préparation de cette étude détaillée et sa distribution gratuite dans les pays en voie de développement.

Publié par: Service International pour l'acquisition des applications d'agro-biotechnologie (ISAAA).

Droit d'auteur: (2003) Service International pour l'acquisition des applications d'agro-biotechnologie (ISAAA)

La reproduction de cette publication à des fins éducatives ou non-commerciale est autorisée sans l'autorisation préalable du détenteur du droit d'auteur, en mentionnant correctement la source.

La reproduction pour la revente ou à des fins commerciales est interdite sans l'autorisation préalable du détenteur du droit d'auteur.

Citation: James, C. 2003. Etude globale des plantes transgéniques commercialisées : 2002 - Etude de cas : Maïs Bt. *ISAAA Briefs* No. 29. ISAAA: Ithaca, NY.

ISBN: 1-892456-38-8

Commande de publications: S.v.p., contactez le Centre ISAAA de l'Asie du SE ou écrivez à publications@isaaa.org

ISAAA SEAsiaCenter
c/o IRRI
DAPO Box 7777
Metro Manila, Philippines

Informations sur ISAAA: Pour obtenir des **informations** au sujet de l'ISAAA, prière de contacter le centre le plus proche de vous:

ISAAA AmeriCenter	ISAAA AfriCenter	ISAAA SEAsiaCenter
417 Bradfield Hall	c/o CIP	c/o IRRI
Cornell University	PO 25171	DAPO Box 7777
Ithaca NY 14853, U.S.A.	Nairobi	Metro Manila
	Kenya	Philippines

ou de contacter info@isaaa.org

Par voie électronique: Pour les résumés de toutes les *ISAAA Briefs*, veuillez visiter le site www.isaaa.org
La version intégrale des *ISAAA Briefs* est aussi disponible par voie électronique au nom de l'ISAAA par CABI Publishing via le *AgBiotechNet* à: <http://www.agbiotechnet.com>

Prix: US\$ 35 par copie, y compris les frais de port.
Disponible gratuitement pour les pays en voie de développement.

CONTENU

Liste des Tables et des Figures	<i>i</i>
Resume	<i>vi</i>
MAÏS Bt	1
1. Introduction	1
2. Le maïs cultivé et ses origines	2
3. Distribution mondiale, Production, Importation et Exportation	5
3.1 Distribution du maïs et Production	5
3.2 Exportations et Importations de maïs	7
3.3 Fermiers : Nombre de fermes et distribution au niveau mondial	8
4. Systèmes de production du maïs et germplasmе du maïs	11
4.1 Systèmes de production du maïs	11
4.2 Zones mondiales semées avec des hybrides, Variétés à pollinisation ouverte (OPV) et Semences sauvegardées par les fermiers	13
4.3 Types de grains de maïs	14
5. Utilisation du maïs	15
6. Demande de maïs en 1997 et comparaison avec les prévisions pour 2020	16
7. Faire face à l'augmentation des demandes – le rôle du maïs Bt	20
8. Insectes nuisibles du maïs	20
Chenilles foreuses	21
Chrysomèles	21
Vers de l'épi de maïs	25
Noctuelles	25
Les chenilles de «ver-gris»	25
Nuisibles d'après récolte	25
8.1 Principaux nuisibles dans les trois pays cultivant le plus de maïs : USA, Chine et Brésil	27
USA	27
Chine	27
Brésil	28
8.2. Distribution des nuisibles du maïs	28
9. Pertes de récolte, coûts de contrôle et gains économiques apportés par le maïs Bt	33
9.1 Etude mondiale	33
9.2 Estimation des pertes et des gains économiques de récolte dus aux chenilles foreuses contrôlées par <i>Cry1Ab</i> par région et par pays	36
USA	36
Europe	41
Amérique Latine	43
Asie	44
Chine	44
Philippines	46
Inde	46

CONTENU

Afrique	47
Résumé	48
9.3 Evaluation préliminaire des pertes dues aux chrysomèles aux USA et des gains associés avec le déploiement du gène Bt <i>cryBb1</i>	49
9.4 Bénéfices obtenus grâce au contrôle des chrysomèles par le maïs avec <i>Cry3Bb1</i>	51
10. Le marché mondial des insecticides destinés au maïs	52
10.1 Potentiel pour la substitution des insecticides	54
11. L'utilisation des gènes Bt dans le maïs	57
11.1 Gènes Bt autorisés pour le maïs	57
11.2 Les gènes Bt récemment libérés	59
11.3 Nouvelle génération de gènes de résistance aux insectes chez le maïs	62
12. Effets potentiels du maïs Bt sur l'environnement	64
12.1 Effets potentiels sur les organismes non-cibles	54
L'expérience du papillon Monarque	66
12.2 Flux de Gènes	67
Races locales de maïs au Mexique	69
12.3 Impact des protéines Cry1Ab dans le sol et dans les eaux de surface	70
12.4 Impact du maïs Bt sur la contamination des aquifères par les insecticides	71
13. Gestion des résistances aux insectes (IRM)	72
13.1 Résistance aux insecticides	72
13.2 Evolution des chrysomèles des racines du maïs pour vaincre le contrôle par la rotation des espèces cultivées	72
13.3 Gestion du maïs Bt pour le contrôle de la pyrale et de la chrysomèle des racines du maïs	73
14. Aspects de sécurité de l'alimentation humaine et animale avec du maïs Bt	76
14.1 Vue d'ensemble et cadre de l'évaluation de la sécurité de l'alimentation humaine et animale	76
14.2 Evaluations des implications potentielles pour la santé	78
Allergénicité	79
Effet sur la position des nutriments	80
Potentiel pour le développement de la résistance aux antibiotiques	80
15. Mycotoxines	81
16. Questions commerciales concernant les plantes cultivées GM modifiées	87
17. Potentiel mondial du maïs Bt : opportunités et défis	92
17.1 Superficie mondiale potentielle pour le maïs à court et moyen terme	93
17.2 Possibilités qu'a le maïs Bt d'augmenter la productivité et la production	96
17.3 Substitution des insecticides et taux de mycotoxines plus bas	98
17.4 Le point de vue du fermier	100
17.5 Opportunités et défis	101

REMERCIEMENTS	103
----------------------	-----

REFERENCES	104
-------------------	-----

LISTE DES TABLES ET DES FIGURES

TABLES

- Table 1. Superficie mondiale de maïs (en millions d'hectares) par région du monde, 2002
- Table 2. Les dix principaux pays producteurs de maïs en 2002
- Table 3. Superficies de maïs, rendement et production des pays du Top 25 des producteurs de maïs en 2002
- Table 4. Nombre de fermiers cultivant le maïs dans le monde et moyenne de la superficie de maïs par ferme
- Table 5. Nombre de fermiers cultivant du maïs dans le monde, exprimé en % par région.
- Table 6. Nombre de fermiers cultivant le maïs (en millions) en Chine, par région et superficie moyenne de maïs (en hectares) par ferme
- Table 7. Superficies de maïs cultivées dans les 4 méga-environnements
- Table 8. Rendements actuels ou potentiels (tonnes/hectare) dans les pays en voie de développement
- Table 9. Zones semées avec des maïs hybrides, des variétés à pollinisation ouverte (OPV) et des semences gardées par le fermier dans les régions des pays industrialisés et des pays en voie de développement en 1999
- Table 10. Utilisation mondiale du maïs 1992 - 1994
- Table 11. Prévisions des demandes de maïs, blé et riz, 1997 et 2020 (millions de tonnes)
- Table 12. Demande de maïs pour les pays en voie de développement en 1997 et en 2020
- Table 13. Demande et utilisation du maïs en 2020
- Table 14. Espèces d'insectes les plus importantes causant des pertes économiques dans les cultures de maïs des les méga-environnement tropicaux, sub-tropicaux, montagneux et tempérés
- Table 15. Distribution et sévérité des infestations des principaux insectes nuisibles aux USA
- Table 16. Distribution et niveaux d'infestation des principaux insectes nuisibles en Chine dans différents méga-environnements
- Table 17. Distribution et gravité des infestations par les principaux insectes nuisibles au Brésil dans différents méga-environnements
- Table 18. Distribution des principaux nuisibles du maïs – pyrales, noctuelles, vers (Lepidotères) et chrysomèles (Coléoptères) dans les pays du Top 25 qui cultivent au moins 1 million d'hectares de maïs.
- Table 19. Estimation des niveaux moyens d'infestations des principaux insectes Lépidoptères et des chrysomèles des racines du maïs dans les pays du Top 25 des producteurs de maïs cultivant 1 million d'hectares de maïs ou plus
- Table 20. Eventail des pertes actuelles et potentielles dues aux insectes nuisibles du maïs pour différentes régions du monde
- Table 21. Estimations mondiales et régionales des pertes de culture dues aux insectes nuisibles du maïs
- Table 22. Résumé de l'impact au niveau de la ferme sur le rendement du maïs Bt aux USA de 1997 à 2000
- Table 23. Avantage de production du maïs Bt aux USA, 1995-2002
- Table 24. Estimations nationales des gains (pertes) économiques nets des fermiers qui plantent du maïs transgéniques aux USA, 1996-2001
- Table 25. Etude détaillée des potentiels du maïs Bt en Europe
- Table 26. Comparaisons des rendements des maïs Bt et conventionnels en Espagne en 1997 (tonnes/hectare)
- Table 27. Comparaison des performances des maïs Bt et conventionnels dans la vallée du Rhin en Allemagne, 1998 -2002
- Table 28. Comparaison des performances des maïs Bt et conventionnels dans la région de Oderbruch, est de l'Allemagne, 2000-2002
- Table 29. Rentabilité du maïs Bt par rapport au maïs conventionnel en Afrique du Sud
- Table 30. Résumé des gains de production en faveur du maïs Bt (*cry1Ab*) et estimations des pertes dues aux chenilles foreuses
- Table 31. Distribution mondiale de la chrysomèle du maïs
- Table 32. Estimation de la distribution des bénéfices découlant du déploiement du maïs Bt *cry3Bb1* aux USA dans une simulation pour l'année 2000

LISTE DES TABLES ET DES FIGURES

- Table 33. Valeur et quantité (en tonnes i.a.) du marché mondial des insecticides du maïs par région, 2001
- Table 34. Mode d'Application des Insecticides aux USA et au Brésil (en tonnes d'i.a.)
- Table 35. Utilisation des insecticides sur le maïs aux USA, par nuisible, 2001
- Table 36. Pourcentage des superficies de maïs traitées avec des insecticides pour les insectes nuisibles cibles au Brésil
- Table 37. Caractéristiques génétiques du maïs Bt
- Table 38. Evénements du maïs Bt qui ont été autorisés pour la plantation commerciale
- Table 39. Efficacité de la protéine Cry1Ab dans le contrôle d'insectes nuisibles du maïs de la famille des Lépidoptères : sensibilité aigüe à la protéine endotoxine Cry1Ab
- Table 40. Performance de MON810 (cry1Ab) pour contrôler des insectes nuisibles du maïs sélectionnés dans du maïs Yield Gard®
- Table 41. Efficacité du TC 1507 avec le gène cry1Fa2 dans le maïs Bt Herculex® 1
- Table 42. Futurs gènes pour les produits conférant une résistance aux insectes nuisibles du maïs
- Table 43. Résumé des rapports publiés sur les effets potentiels du maïs Bt exprimant la protéine Cry1Ab sur les organismes non-cibles et les prédateurs
- Table 44. Comparaison des effets de concentration non-observables (NOEC) dans le sol par rapport aux concentrations environnementales estimées (EEC) des toxines Bt
- Table 45. Niveau des Effets Non Observables (NOEL) pour la mortalité après l'exposition de rats à la protéine Bt purifiée toxique
- Table 46. Concentration de protéine (en micro-grammes par gramme de tissus humide de plante) dans différents tissus du maïs à la maturité de la plante et estimation des quantités (en grammes de protéines par acre de maïs)
- Table 47. Effets sur la santé des fumonisines pour diverses espèces
- Table 48. Impact de la consommation de maïs et du niveau de fumonisine sur le PMTDI
- Table 49. Niveaux de fumonisine (ig/kg) et d'ergostérol (mg/kg) dans les grains de maïs en Italie en 1997, 1998 et 1999
- Table 50. Niveaux de mycotoxines Fumonisine, enregistrés dans les grains de maïs conventionnels
- Table 51. Echanges agricoles entre les USA et l'Union Européenne : 2001
- Table 52. Exportations de maïs américain vers différentes régions en 2001, exprimées en pourcentage des exportations totales de maïs
- Table 53. Exportations américaines de maïs vers l'Union Européenne
- Table 54. Superficie mondiale potentielle pour le maïs Bt (cry1Ab)
- Table 55. Gains potentiels estimés suite au déploiement du maïs Bt avec le gène cry1Ab pour le contrôle des nuisibles du maïs, principalement les chenilles foreuses, dans les pays du Top 25 des pays producteurs de maïs
- Table 56. Estimation des pertes mondiales dues aux nuisibles du maïs et gains du maïs Bt
- Table 57. Projection des gains relatifs de rendement pour différentes régions liés au déploiement du maïs Bt avec le gène *cry1Ab*

FIGURES

- Figure 1. Distribution de la production mondiale de maïs
- Figure 2. Illustration des parties de la plante de maïs sur lesquelles les principaux insectes nuisibles causent des dommages
- Figure 3. Distribution mondiale des pyrales du maïs.
- Figure 4. Distribution mondiale des chrysomèles du maïs
- Figure 5. Top 25 des pays producteurs de maïs, avec les détails concernant les superficies de maïs (Millions d'hectares [Mha]), la proportion de la superficie de maïs infestée (Faible, Moyen, Elevé), et les principaux insectes nuisibles
- Figure 6. Diminution de la production due à la Pyrale
- Figure 7. Densité de pyrale en Illinois, 1943-2002

Etude de cas : Maïs

L'étude de cas du maïs Bt se consacre à :

- Evaluer les performances de la première génération de maïs Bt avec le gène *cry1Ab* jusqu'à aujourd'hui sur une base mondiale durant les sept dernières années,
- Evaluer le futur potentiel du gène *cry1Ab* et des autres gènes Bt ou des nouveaux gènes qui confèrent une résistance pour les principales chenilles/phalènes (Lépidoptères), et plus spécialement l'important complexe des chenilles foreuses,
- Une évaluation préliminaire des nouveaux gènes pour le contrôle des chrysomèles des racines du maïs (Coléoptères/scarabées), un nuisible important dans les Amériques qui a aussi été détecté dans 13 pays en Europe,

Le but principal est de présenter un ensemble de données qui ont été regroupées en vue de faciliter une discussion basée sur les connaissances des bénéfices et des risques potentiels que le maïs Bt offre à la société mondiale. Les thèmes présentés comprennent :

- La plante maïs et ses origines ;
- La distribution mondiale du maïs dans les pays en voie de développement et dans les pays industrialisés, par zone, sa production, sa consommation, son importation et son exportation ainsi que les futures demandes en 2020 ;
- La détermination des régions semées avec des hybrides, des variétés à pollinisation ouvertes et des semences conservées par le fermier ;
- L'estimation du nombre de fermiers produisant du maïs dans le monde par pays principal ainsi que de taille moyenne des fermes cultivant du maïs ;
- Les systèmes de production du maïs, développement du germplasm et utilisation du maïs ;
- Une étude des insectes nuisibles du maïs ainsi que des pertes de récolte qu'ils causent, y compris les coûts de contrôle et une analyse du marché mondial

d'insecticides pour le maïs, évalué à 550 millions de \$ ainsi que des gains provenant du maïs Bt ;

- Le déploiement du gène *cry1Ab* dans le maïs Bt, son adoption mondiale et évaluation des bénéfices ;
- Un aperçu de la deuxième génération de gènes qui comprend les gènes *cry3Bb1* et *cry1Fa2* commercialisés pour la première fois aux USA en 2003, et de cinq autres produits de gènes qui sont en développement et seront lancés durant les trois prochaines années ;
- Une étude détaillée de la gestion des résistances des insectes (GRI), de l'effet potentiel du maïs Bt sur l'environnement et sur les aspects de sécurité de l'alimentation humaine et animale avec du maïs Bt. Le thème important des mycotoxines ainsi que les avantages offerts par le maïs Bt, qui contient des taux plus bas de la mycotoxine fumonisine, en terme de sécurité de l'alimentation humaine et animale, particulièrement dans les pays en voie de développement sont abordés ;
- Une vue générale rapide sur le thème du commerce en liaison avec le maïs Bt aux USA et dans l'Union Européenne ;
- Une conclusion comportant une évaluation du potentiel mondial du maïs Bt, une technologie sûre et durable qui a la capacité de faire une contribution critique à la sécurité mondiale de l'alimentation humaine et animale, plus spécialement face à la demande sans précédent d'environ 850 millions de tonnes en 2020. 60% de cette demande seront utilisés dans les pays en voie de développement qui auront fait face au formidable défi de produire la plupart de leur demande de maïs dans leurs propres pays, les importations ne fourniront que 10 % au plus de la demande.

La plante cultivée maïs

Environ 75 pays situés tant dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de

développement, cultivent chacun au moins 100'000 hectares de maïs soit un total de 140 millions d'hectares produisant 600 millions de tonnes de grains de maïs par an qui sont évaluées à 65 milliards de \$ annuellement en se basant sur le prix international de 108 \$/tonne. Les pays en voie de développement plantent les deux tiers de la superficie mondiale de maïs et les pays industrialisés un tiers. Le Top cinq des producteurs de maïs sont les USA (229 millions de tonnes), la Chine (124 millions de tonnes), le Brésil (35,5 millions de tonnes), le Mexique (19 millions de tonnes) et la France (16 millions de tonnes). Parmi le Top 25 des pays producteurs de maïs dans le monde, 8 sont des pays industrialisés et 17 des pays en voie de développement dont 9 sont situés sur le continent africain, 5 dans continent asiatique et 3 dans continent sud-américain. Il y a environ 200 millions de fermiers cultivant du maïs dans le monde dont 98 % habitent dans les pays en voie de développement : 75 % en Asie (105 millions dans la Chine seule), entre 15 et 20 % en Afrique et 5 % en Amérique Latine. Les deux tiers des semences de maïs vendues dans le monde sont des hybrides et seulement 20 % sont des graines conservées par le fermier. En fait, les semences d'hybrides sont le principal type de graines dans les principaux pays en voie de développement qui ont un système de distribution des semences déjà en place pour fournir le maïs Bt aux fermiers. Par exemple, 84 % des 105 millions de fermiers chinois achètent des semences hybrides et 81 % de toutes les semences de maïs utilisées en Afrique de l'est et du sud sont des hybrides.

Les insectes nuisibles et la perte de valeur des plantes cultivées

Les Lépidoptères nuisibles, plus particulièrement le complexe des chenilles foreuses, sont une contrainte majeure pour augmenter la productivité et ils sont économiquement important dans la plupart des pays producteurs de maïs dans le monde. Un peu moins de la moitié (46%) des superficies de maïs dans les 25 pays producteurs de maïs clés qui ont des infestations moyennes (40 % des superficies infestées dans les zones tempérées) à fortes (60% des superficies infestées dans les tropiques/sub-

tropiques) dues à des Lépidoptères nuisibles. Les chrysomèles des racines de maïs infestent 20 millions d'hectares dans les Amériques, nécessitant plus d'insecticides qu'aucun autre nuisible aux USA, avec des pertes et des mesures de contrôle coûtant, aux USA, un milliard par an. Les pertes mondiales dues aux insectes nuisibles sont de 9 %, soit 52 millions de tonnes de maïs évaluées à 5,7 milliards de \$ annuellement. La lutte contre les nuisibles utilise des insecticides pour une valeur de 550 millions de \$. Les pertes associées avec les Lépidoptères nuisibles, qui peuvent être contrôlées par *cry1Ab* sont estimées à 4,5 % soit la moitié des pertes totales dues aux insectes dans les cultures de maïs.

Bénéfices mondiaux potentiels du maïs Bt

Le maïs Bt a montré qu'il est sûr et efficace. Ayant passé des tests rigoureux pour la sécurité des aliments destinés à la consommation humaine et animale, il fournit un contrôle de nuisibles cibles respectueux de l'environnement et efficace. Après sept ans de déploiement sur 43 millions d'hectares, la résistance est encore durable. C'est le premier produit de maïs Bt qui est largement commercialisé avec des stratégies de gestion de résistance préventives basées sur la science. Cette gestion comporte des refuges (zones plantées avec du maïs non-Bt) qui sont utilisés en combinaison avec la technologie des doses élevées. L'augmentation la production due au déploiement mondial du gène *cry1Ab* dans les maïs Bt pourrait atteindre 35 millions de tonnes, soit 3,7 milliards de \$ par an. Les gains de rendement imputables au maïs Bt sont estimés à 5 % dans les zones de cultures des régions tempérées et de 10 % dans les zones tropicales. Dans ces régions, les nuisibles sont plus nombreux et leurs générations se superposent, ce qui conduit à des niveaux d'infestation et des pertes plus importantes. D'un point de vue mondial, le potentiel du maïs Bt à court et moyen terme est important. Il y a plusieurs raisons pour cela :

- Premièrement, le gène *cry1Ab* a fourni un contrôle efficace pour plusieurs des principaux nuisibles du maïs, principalement les chenilles foreuses, et un

contrôle partiel pour les autres chenilles nuisibles comme le légionnaire uniponctué et le ver de l'épi de maïs. Les performances efficaces du maïs Bt (*cry1Ab*) ont provoqué son adoption rapide sur 43 millions d'hectares dans sept pays depuis son introduction en 1996.

- Deuxièmement, de nouveaux produits, déjà lancés, comprennent le gène *cry3Bb1* qui contrôle la chrysomèle des racines de maïs aux USA en 2003 et le gène *cry1Fa2* qui fournit un contrôle efficace des nuisibles contrôlés par le *cry1Ab* ainsi qu'un contrôle renforcé du légionnaire d'automne et de la noctuelle ypsilon. De plus, il y a cinq nouveaux gènes Bt et nouveaux gènes qui devraient être lancés dans les trois prochaines, qui apporteront la diversité nécessaire dans les modes d'action afin de permettre un contrôle encore plus efficace sur un éventail plus large des principaux nuisibles du maïs.
- Troisièmement, en plus des avantages significatifs que le maïs apporte, en tant qu'outil de gestion des nuisibles, le produit offre des aliments plus sûrs tant pour les hommes que pour les animaux que le maïs conventionnel car il contient des taux de mycotoxines nocives plus faibles, une caractéristique de plus en plus importante car la sécurité de l'alimentation humaine et animale s'est vu assigner une priorité élevée. Parmi les trois principaux aliments de base (maïs, blé, riz), le maïs est actuellement le seul pour qui la commercialisation de la technologie se traduit par un bénéfice important. Le maïs Bt offre maintenant une augmentation de l'éventail des options pour répondre aux besoins très variés de l'environnement dans lequel est cultivé le maïs.

Les fermiers ont donné une forte valeur au maïs Bt car c'est une technologie pratique et rentable qui leur permet de gérer le risque dans des environnements aléatoires et leur offre une assurance contre des pertes de récolte

catastrophiques durant les années où les infestations sont exceptionnellement élevées. Par exemple, les bénéfices liés à l'utilisation du Bt pour contrôler les chrysomèles des racines du maïs aux USA seulement, où elle infeste 13 millions d'hectares, sont estimés à 460 millions de \$ par dont les deux-tiers des gains sont pour les fermiers et un tiers pour le développeur de la technologie. Les gains des producteurs, 289 millions de \$, seraient associés avec une augmentation des rendements, une diminution des coûts de production et une diminution significative (2'300 tonnes d'i.a. au minimum) de l'utilisation d'insecticides, qui est actuellement la plus importante pour tous les nuisibles aux USA. Le déploiement mondial des gènes Bt, ou de nouveaux gènes, pour contrôler les principaux Lépidoptères nuisibles du maïs ainsi que la chrysomèle des racines du maïs a le potentiel de substituer jusqu'à 40 à 50 % des 10'7000 tonnes (i.a.) actuelles d'insecticides utilisées sur le maïs mondialement, évaluées à 550 millions de \$ annuellement ; ceci a des implications environnementales importantes.

Défis et opportunités

Avec des gains de récolte potentiels qui ont atteint jusqu'à 25 millions de tonnes avec la première génération du maïs Bt (*cry1Ab*) et devraient être encore plus importants avec la deuxième génération du maïs Bt et les nouveaux gènes, le maïs Bt représente un défi et une opportunité pour contribuer à la sécurité des aliments pour les hommes et les animaux en 2020, quand, pour la première fois, la demande de maïs excèdera les demandes de blé et de riz. Le défi est de produire 266 millions de tonnes supplémentaires au niveau mondial pour répondre à une demande mondiale sans précédent qui sera d'environ 850 millions de tonnes de maïs en 2020. Cette demande sera soutenue par une demande plus forte de viande dans une société mondiale plus riche. Les 35 millions de gains potentiels provenant du maïs Bt représentent presque 15 % de la contribution des 266 millions de tonnes supplémentaires nécessaires en 2020. Parmi les 266 millions de tonnes supplémentaires nécessaires mondialement en 2020, 80 %, soit 213 millions de tonnes, seront

demandés dans les pays en voie de développement. Cela représente un défi pour ces pays qui devront optimiser la production nationale afin de répondre à leur propre augmentation de besoins car les importations ne fourniront qu'environ 10 % seulement. Le maïs Bt pourrait, d'un point de vue technologique, délivrer des bénéfices sur 40 à 45 millions d'hectares à court et moyen terme comparativement aux 10 millions d'hectares qu'il occupe aujourd'hui. Ceci devrait représenter une motivation pour la plupart des pays en voie de développement qui consomment du maïs, comme la Chine et le Brésil, pour autoriser et adopter le maïs Bt à cause des bénéfices importants et multiples qu'il offre, y compris les risques plus faibles associés avec l'alimentation humaine et animale. Les principales contraintes sont le manque de capacité de réglementation dans beaucoup de pays en voie de développement avec l'acceptabilité et les questions du commerce, qui ont une importance similaire, particulièrement en relation avec l'influence du marché de l'Union Européenne. Le maïs Bt est susceptible de continuer à enregistrer des taux de croissance élevés à court-terme dans des marchés traditionnels comme les USA, le Canada, l'Argentine, l'Afrique du sud, l'Espagne, les Philippines et le Honduras. Dans le processus d'autorisation légale et d'acceptation, l'Asie offre des nouvelles opportunités importantes particulièrement en Chine et en Inde, Indonésie et Thaïlande. D'autres marchés importants comprennent le Brésil et le Mexique en Amérique Latine ainsi que l'Egypte, le Kenya et le Nigeria sur

le continent africain. L'acceptation sera le principal facteur qui va gouverner l'autorisation et l'adoption dans les pays d'Europe de l'est comme la Roumanie et la Hongrie qui sont candidats à l'adhésion à l'Union Européenne. En Europe de l'ouest, la France, l'Italie et l'Allemagne ont le plus à gagner de la technologie mais des considérations politiques liées à l'acceptation continuent à provoquer le rejet de la technologie sauf en Espagne où le maïs Bt a été un succès, occupant 10 % des superficies nationales de maïs en 2003, soit un doublement par rapport à 2002 où le pourcentage était de 5 %. Il a été prouvé que le maïs Bt est une technologie sûre et efficace qui a le potentiel de délivrer des bénéfices sur 25 millions d'hectares via le système des hybrides dans les méga-environnements tempérés, parmi lesquels la Chine est le pays qui offre les plus grandes possibilités. Dans les environnements tropicaux avec un potentiel de 18 millions d'hectares de maïs Bt via les systèmes hybrides, le Brésil a le potentiel le plus important. Le maïs Bt offre une opportunité unique. C'est une motivation pour les principaux pays producteurs de maïs dans le Tiers-Monde afin d'autoriser et d'adopter le maïs Bt et ainsi de bénéficier des bénéfices nombreux et multiples qu'il offre en terme de sécurité de l'alimentation humaine et animale qui sera aussi plus abordable. Le maïs Bt peut contribuer de manière importante à la sécurité de l'alimentation humaine et animale et à la diminution de la pauvreté et de la malnutrition qui touche 24'000 personnes dans les pays en voie de développement en Asie, Afrique et en Amérique Latine.

LE MAÏS Bt

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'évaluation : des performances obtenues jusqu'à présent avec le maïs Bt contenant le gène *cry1Ab* sur une base mondiale ; du futur potentiel mondial du maïs Bt ou du maïs avec des nouveaux gènes qui confèrent une résistance aux principales chenilles/phalènes (Lépidoptères), particulièrement le complexe des pyrales ; préliminaire du nouveau gène *cry3Bb1* qui permet de contrôler la chrysomèle des racines du maïs (Coléoptères). Ce complexe comprend une variété d'espèces comme *Ostrinia nubilalis*, *Ostrinia furnacalis*, *Diatraea grandiosella*, *Diatraea saccharalis*, *Elasmopalpas lignosellus*, *Sesamia cretica*, *Busceola fusca* et *Chilo partellus*. D'autres nuisibles du maïs de la famille des Lépidoptères, comme *Spodoptera frugiperda* et *Helicoverpa zea*, sont importants dans quelques pays seulement. Le complexe des nuisibles des chrysomèles du maïs (*Diabrotica spp.*) est un complexe majeur d'un point de vue économique aux USA. Il est aussi présent dans d'autres pays d'Amérique du nord et d'Amérique Latine, comme le Canada, le Mexique, l'Argentine et le Brésil. La chrysomèle du maïs a aussi été détectée dans treize pays en Europe. Les méthodes actuelles de gestion des nuisibles chez le maïs sont entièrement basées sur l'utilisation des insecticides mais les fermiers utilisent aussi les pratiques agricoles, comme la plantation précoce ou l'utilisation d'agents de contrôle biologique dans le contexte d'une stratégie de gestion intégrée des nuisibles (IPM). Durant les sept dernières années, plusieurs pays ont adopté les plantes cultivées génétiquement modifiées, mettant en avant les gènes Bt pour contrôler quelques-uns des principaux nuisibles du maïs. Les variétés de maïs Bt exprimant le gène *cry1Ab* ont été adoptées pour la première fois il y a sept ans en 1996. En 2002, les variétés contenant ce gène ont été déployées commercialement dans sept pays, quatre pays industriels (USA, Canada, Espagne et Allemagne) et trois pays en voie de développement (Argentine, Afrique du Sud et Honduras (pré-

commercialisation). Les Philippines ont autorisé en décembre 2002 le maïs Bt qui a été semé pour la première fois en 2003). Il existe maintenant beaucoup de données publiées ou non provenant d'essais en champ et d'études indépendantes réalisées par des institutions du secteur public, qui peuvent être utilisées pour évaluer l'impact de la commercialisation du maïs Bt jusqu'à aujourd'hui. Ces études ont rassemblé des informations sur les impacts environnementaux, économiques, sociaux et sur la santé dans des systèmes agricoles à petite et à grande échelle, dans les pays industrialisés et ceux en voie de développement.

Le contenu de ce chapitre est structuré de manière chronologique de manière à fournir au lecteur une vision globale de la plante cultivée maïs, puis à présenter les données actuellement disponibles permettant d'évaluer les performances du maïs Bt jusqu'à présent ainsi que de projeter son futur potentiel mondial. La polarisation sur les pays en voie de développement est conforme à la mission de l'ISAAA qui est d'aider les pays en voie de développement à évaluer le potentiel des nouvelles applications des biotechnologies aux plantes cultivées. Le but principal est de présenter un ensemble consolidé des données qui va faciliter une discussion basée sur les connaissances des risques et des bénéfices potentiels que le maïs Bt offre à la société mondiale. Les thèmes présentés dans ce chapitre sont :

- La plante cultivée maïs et ses origines.
- La distribution mondiale du maïs dans les pays industrialisés et en voie de développement, par région, production, consommation, importation et exportation ainsi que les superficies semées avec des hybrides, OPVs, semences gardées par les fermiers et le nombre de fermiers cultivant du maïs et la taille des fermes.
- Les systèmes de production du maïs et le développement du germplasm de maïs.
- L'utilisation du maïs.
- La demande en maïs en 1997 et la projection pour 2020.
- Les insectes nuisibles du maïs.

- Les pertes de la plante cultivée dues aux insectes nuisibles du maïs et les bénéfices du maïs Bt.
- Le marché mondial des insecticides du maïs.
- L'utilisation des gènes Bt chez le maïs, leur adoption mondiale et les bénéfices.
- Les effets potentiels du maïs sur l'environnement.
- La gestion des résistances aux insectes (IRM)
- Aspect de la sécurité des aliments pour les hommes et les animaux du maïs Bt.
- Mycotoxines
- Questions commerciales
- Potentiel mondial pour le maïs Bt : Opportunités et défis.

2. Le maïs cultivé et ses origines

Le maïs est apparu au Mexique il y a 6 à 7 000 ans (Smith 1995). C'est maintenant la céréale la plus importante dans beaucoup de régions différentes du monde. Il est cultivé dans un plus grand nombre d'environnements différents qu'aucune autre céréale. Le maïs (*Zea mays*, L) appartient à la famille des graminées qui comprend toutes les céréales et les graminées fourragères. L'espèce apparentée la plus proche du maïs domestiqué est la téosinte, une espèce annuelle qui pousse au Mexique, au Guatemala et au Nicaragua. Elle pourrait être l'ancêtre du maïs car elle a le même nombre de chromosomes (10). Le maïs n'a pas d'espèces apparentées du même genre. La téosinte et le maïs peuvent s'hybrider et produire une descendance fertile sous certaines conditions, bien que le flux de gènes du maïs vers la téosinte soit très limité à cause d'une barrière génétique (Evans and Kermicle 2001). Une différence principale entre les deux genres est que la téosinte disperse ses propres graines, ce qui n'est pas le cas du maïs.

Le plus ancien témoignage de la domestication du maïs provient de sites archéologiques au Mexique datant de 7'000 ans, ce qui coïncide presque avec le début de l'agriculture il y a 10'000 ans. Il est probable que le maïs se soit dispersé depuis son

centre d'origine au Mexique vers l'Amérique centrale et latine, les Caraïbes et l'Amérique du Nord, bien que l'hypothèse selon laquelle le maïs ait aussi été domestiqué simultanément dans la région des Andes par les Incas a été émise. Dans quelques cas, les explorateurs européens des Amériques ont transporté le maïs en Europe et, à leur tour, les commerçants l'ont transporté en Asie et en Afrique.

L'évolution du maïs a été fortement influencée par les êtres humains, qui ont probablement en premier lieu commencé à sélectionner les épis à partir de semis annuels spontanés de la téosinte. En 1000 après J.-C., cette intervention humaine a eu pour résultat l'épi de maïs avec plusieurs rangs que nous connaissons aujourd'hui et qui offre une meilleure productivité. Cependant, du point de vue de la conservation du génome et à cause du fait que le maïs est une plante allogame, il est important de reconnaître que beaucoup de fécondations croisées se sont produites durant ce processus de sélection. Au moment où Christophe Colomb est arrivé à Cuba en 1492, le maïs est largement cultivé comme une plante pour la consommation humaine. C. Colomb a ramené quelques grains jaunes de maïs de Cuba vers l'Espagne et, dans les années 1500, les commerçants portugais et espagnols l'ont à leur tour introduit dans plusieurs autres parties du monde. Les commerçants arabes l'ont probablement amené en Inde et au Pakistan le long de la route de la soie. Au milieu des années 1600, avant l'arrivée de Magellan, le maïs s'était établi tant en Thaïlande qu'aux Philippines. Au milieu des années 1700, il était cultivé dans le sud de la Chine et s'était établi comme nouvel aliment tant au Japon qu'en Corée (Dowswell et al. 1996).

Au milieu du 19^{ème} siècle, les « fermiers grainetiers » aux Etats Unis ont obtenu des progrès importants grâce à la sélection et ils ont développé quelques variétés de maïs allogames très productives. Des croisements entre les variétés de maïs dentées de l'Est et les doux du sud ont produit une première génération de variétés de maïs dentées à haut rendement dans la région du corn belt. Au 20^{ème} siècle, la connaissance de la génétique mendélienne a conduit aux hybrides révolutionnaires qui ont été

développés dans la région du corn belt aux USA et sont maintenant utilisés sur 95 millions des 140 millions d'hectares de maïs cultivés aujourd'hui à travers le monde.

Les graines de maïs, plantées à une profondeur correcte dans le sol avec une humidité appropriée, vont germer en 8 à 14 jours selon la température. Au début, les plantules de maïs dépendent de l'amidon contenu dans la graine maïs, rapidement, elles deviennent auto-suffisantes pour les nutriments et elles n'ont pas besoin de beaucoup d'humidité pour survivre. De l'émergence à la floraison, la période de végétation, le maïs avec ses longues feuilles larges et un système de photosynthèse C4 très efficace, utilise efficacement le pouvoir solaire à sa pleine capacité. Avant l'émission des soies, le maïs est sensible au stress hydrique qui peut réduire significativement le rendement et la fertilité. Le stade critique pour la production des grains se situe au moment où les soies, émergeant des épis en développement, sont pollinisées par les grains de pollen libérés durant une à deux semaines. La pollinisation se produit dans les 24 heures quand le tube du pollen descend le long des soies et fertilise l'ovule pour former un grain – 2 à 3 jours environ sont nécessaires pour que toutes les soies soient pollinisées de manière à former un épi de grain complet. Durant la période qui va de l'émission des soies au stade de maturité, les grains se remplissent et mûrissent. Ensuite, la période de séchage commence. L'humidité contenue dans les grains va diminuer jusqu'à atteindre 15%.

Parmi les trois principales denrées de base au niveau mondial, le maïs se place seulement second après le blé, en tonnage total, avec le riz blanchi qui arrive en troisième position. Le maïs est la principale céréale en Amérique latine et en Afrique. Il se place au troisième rang en Asie qui produit 90 % du riz mondial ainsi que beaucoup de blé. Dans les pays industrialisés, le maïs arrive au second rang après le blé. En 2002, 73 pays, dont 53 pays en voie de développement et 20 pays industrialisés, ont récolté chacun plus de 100'000 hectares de maïs (FAOSTATS 2002). De toutes les céréales, le maïs est la mieux adaptée à différents environnements. Il

croît à des latitudes de plus de 50° Nord et sud de l'équateur, et jusqu'à des altitudes de plus de 3'000 mètres dans des climats froids et chauds, sous irrigation, culture sous pluie ou dans des conditions semi-arides. Le cycle de croissance du maïs varie de manière importante selon l'environnement, entre 3 et 13 mois (Dowswell et al.1996).

600 millions de tonnes de maïs ont été produites dans le monde en 2002 sur environ 140 millions d'hectares dont les deux tiers sont situés dans les pays en voie de développement. Malgré le fait qu'un tiers seulement de la superficie de production soit situé dans les pays industrialisés, ces derniers produisent plus de la moitié de la production globale. En 2002, le rendement moyen était de 4,3 tonnes par hectare. L'écart entre les pays industrialisés, avec un rendement moyen de 6 tonnes/hectare, et les pays en voie de développement, avec la moitié de ce niveau soit environ 3 tonnes/hectare est significatif. Avec une bonne gestion dans un environnement favorable, le maïs peut produire 10 tonnes par hectare dans la région de la corn belt aux USA ou en Europe de l'ouest - France ou Italie. Cependant, les fermiers de subsistance avec faibles ressources dans les pays en voie de développement vont souvent ne récolter que 0,5 tonnes/hectare voire moins. La différence de niveaux de rendements dépend de nombreux facteurs reliés aux différences entre les systèmes de production. Dans les pays industrialisés, des maïs hybrides sont cultivés avec des moyens mécanisés sur des terres irrigués et amendées, alors que dans beaucoup de pays en voie de développement, des anciennes races et des variétés non améliorées sont cultivées dans des sols pauvres et des conditions arides avec des apports faibles.

Alors que le blé et le riz sont principalement utilisés dans l'alimentation humaine, le maïs est utilisé dans une gamme plus étendue comprenant la nourriture humaine, l'alimentation et le fourrage pour les animaux ainsi qu'une multitude d'utilisations industrielles comme l'amidon, les édulcorants et la production d'éthanol. L'alimentation animale représente au moins les trois quarts de l'utilisation du maïs dans les pays industrialisés alors qu'il reste

la nourriture de base dans beaucoup de pays de l'Afrique sub-saharienne et d'Amérique centrale. Selon la préférence des fermiers et des consommateurs, différents types de germplasm de maïs sont utilisés dans le monde. Les hybrides de maïs jaunes sont utilisés dans les pays industrialisés principalement pour l'alimentation animale et les utilisations industrielles alors que dans les pays en voie de développement, les germplasmes de maïs blanc non améliorés à faibles rendements fournissent de la nourriture pour les fermiers de subsistance. Les grains de maïs peuvent être répartis en deux types principaux selon leur couleur et leur dureté – couleur, jaune pour l'alimentation animale et blanche pour l'alimentation humaine – dureté, maïs à grains dentés qui sont durs et brillants et maïs à grains vitreux qui sont opaques avec de l'amidon souple plutôt que dur.

La tendance mondiale de la production indique que durant les 50 dernières années, dans les pays industrialisés, environ 90% de l'augmentation de la production a été obtenue par une amélioration de la productivité, alors que dans les pays en voie de développement seulement 50% sont dus à une amélioration de la productivité tandis que les autres 50 % proviennent d'une augmentation de la superficie cultivée avec du maïs. Ce fossé significatif entre les pays industrialisés et les pays en voie de développement, qui existe encore, a diminué durant la dernière décennie. Cette tendance devrait se poursuivre dans les prochaines années car les pays en voie de développement ont maintenant plus de facilité pour accéder aux nouvelles technologies et les déployer, y compris les plantes cultivées GM comme le maïs Bt. La demande pour le maïs devrait augmenter significativement, spécialement dans les pays en voie de développement où l'augmentation de la population, des revenus et les changements dans la diète qui comprend plus de viande va créer une demande supplémentaire de maïs par rapport au blé ou au riz. Le commerce mondial du maïs a augmenté significativement de 15 millions de tonnes en 1950 à 80 millions de tonnes par an en 1980. Depuis le début des années 1980, le commerce mondial se situe entre 60 et 75 millions de tonnes par an. Les prix internationaux du maïs, réajustés

pour l'inflation, ont diminué d'environ 225 \$ US/tonne dans les années 1960 à environ 115 USD dans le milieu des années 1990. Le prix dérisoire d'une tonne de maïs jaune N°2 des Gulf Ports aux USA était de 108 \$ US au milieu de l'année 2003 (World Bank 2003). Etant donné que beaucoup de pays ne participent pas aux marchés internationaux du maïs, les prix du marché national peuvent varier significativement du prix international, Ceci est le cas dans l'Union Européenne et, plus particulièrement celui de nombreux pays en voie de développement où les prix peuvent fluctuer de manière importante en fonction de l'offre et de la demande. Bien que ce soit la stabilité qui caractérise les prix internationaux du maïs, en contraste, des fluctuations importantes caractérisent les marchés nationaux, particulièrement ceux des pays en voie de développement qui sont sujets à une stabilité plus faible dans la production nationale et l'écoulement à bas prix de grains par les exportateurs.

La future demande de maïs devrait augmenter d'environ 600 millions de tonnes aujourd'hui à environ 850 millions de tonnes en 2020 (IFPRI 2003), avec des nouvelles modifications importantes en faveur du maïs dans les pays en voie de développement. L'industrie mondiale des semences de maïs devrait continuer à répondre et à croître en parallèle avec l'augmentation de la demande du marché. L'augmentation de la production de maïs devrait se produire à la fois dans les pays industrialisés d'Amérique du nord et dans ceux de l'Europe, mais une grande partie de cette augmentation devra venir d'une amélioration de la production dans les pays en voie de développement où la proportion des importations ne devrait pas augmenter même si le tonnage absolu des importations augmentera. Par conséquent, des pays comme la Chine et l'Inde en Asie, le Brésil et le Mexique en Amérique Latine et l'Afrique du Sud sur le continent africain, devront augmenter leur productivité et leur production de manière importante afin de satisfaire la future augmentation de leurs besoins en maïs. Dans de nombreux pays en voie de développement, particulièrement en Asie, l'augmentation de la demande sera dictée par un changement dans la diète qui comprendra plus de

viande ce qui en fin de compte nécessite plus de maïs pour l'alimentation animale.

Les insectes nuisibles devraient entraîner des pertes dans la production mondiale s'élevant à plus de 50 millions de tonnes par an. Ils continueront à être la principale contrainte pour obtenir les augmentations nécessaires de la productivité future ébauchées ci-dessus. Le déploiement de plusieurs de gènes Bt pour contrôler divers insectes nuisibles est une des nouvelles technologies les plus prometteuses pour obtenir les augmentations potentielles de rendement des germplasmés améliorés de maïs. Ces rendements potentiels ne sont pas obtenus actuellement à cause de pertes significatives dues aux chenilles foreuses et à d'autres nuisibles, contre lesquels le gène Bt confère une résistance. Les bénéfices supplémentaires liés au déploiement de la technologie Bt sont une diminution significative des niveaux de mycotoxines toxiques dans les produits alimentaires pour les hommes et les animaux dérivés des grains de maïs et une diminution de la dépendance vis-à-vis des insecticides, qui peuvent polluer l'environnement et mettre en danger la santé des fermiers. Ce sont ces bénéfices potentiels importants associés au maïs Bt qui seront examinés et discutés dans ce chapitre.

3. Distribution mondiale, Production, Importation et Exportation

La distribution mondiale du maïs est donnée dans la figure 7 où chaque point représente 75'000 tonnes par an.

3.1 Distribution du maïs et Production

Parmi les 140 millions d'hectares de maïs cultivés et récoltés dans le monde en 2002, deux tiers (66%) sont cultivés dans les pays en voie de développement et un tiers (34%) dans les pays industrialisés. Parmi les 92 millions d'hectares des pays en voie de développement, 30% (42 millions d'hectares) sont situés en Asie, 19 % (27 millions

d'hectares) en Amérique Latine et le reste (17 % soit 23 millions d'hectares) en Afrique (Table 1). Parmi les dix premiers producteurs du monde (table 2), les USA représentent au moins 40% de la production mondiale et la Chine 20%, ainsi ces deux pays représentent à eux seuls au moins 60% de la production mondiale.

Table 1. Superficie mondiale de maïs (en millions d'hectares) par région du monde, 2002

Région	Millions d'hectares
Pays en voie de développement	
Asie	42 (30%)
Amérique Latine	27 (19%)
Afrique	23 (17%)
Sous-total	92 (66%)
Pays industrialisés	
Amérique du Nord	34 (25%)
Europe et autres	13 (9%)
Sous-total	47 (34%)
Total Mondial	139 (100%)

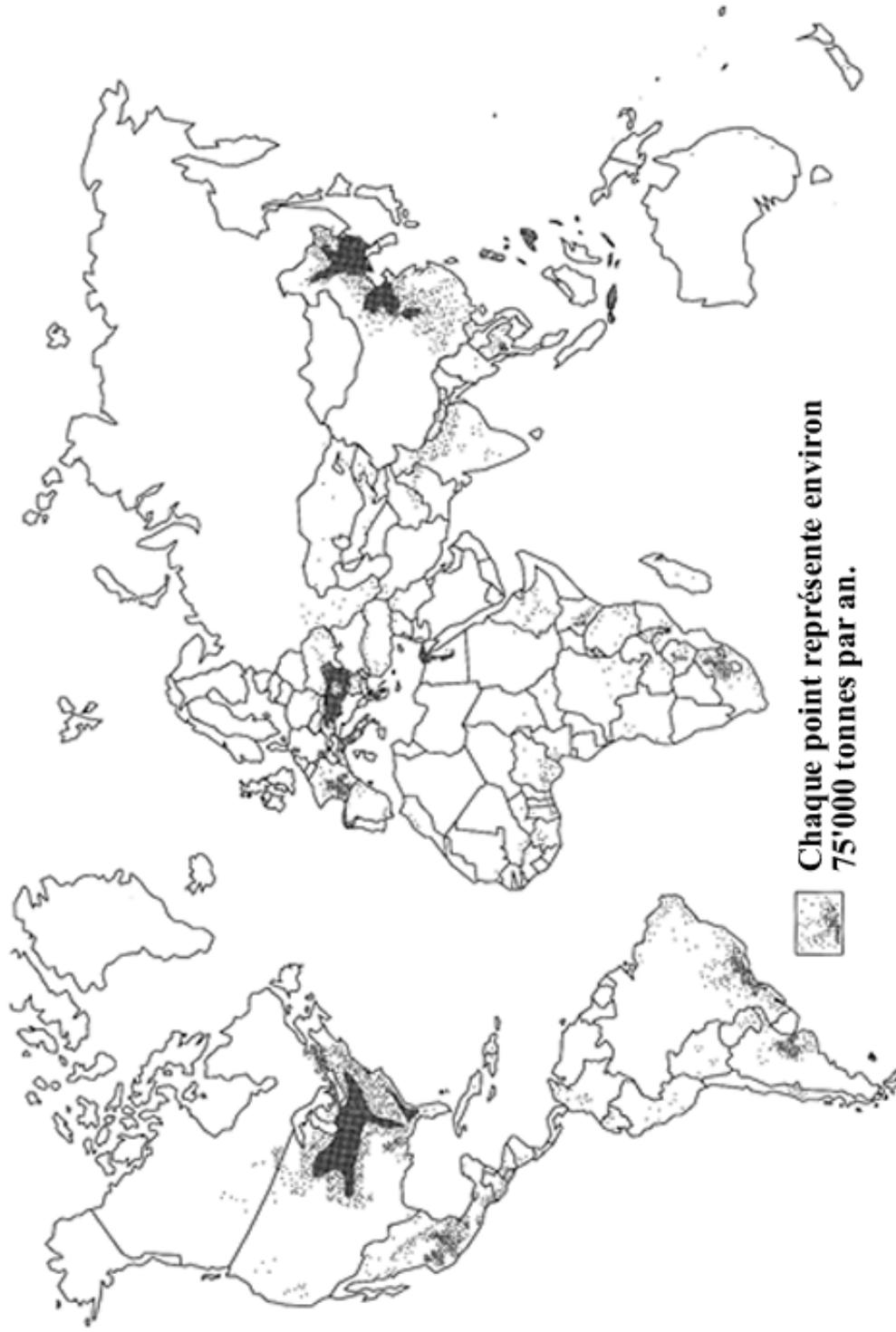
Source: FAOSTATS 2002.

Table 2. Les dix principaux pays producteurs de maïs en 2002

Pays	Production (Millions de tonnes)
1. USA	228,7
2. Chine	124,2
3. Brésil	35,5
4. Mexique	19,0
5. France	16,0
6. Argentine	14,7
7. Inde	12,0
8. Italie	11,6
9. Indonésie	9,3
10. Afrique du Sud	9,1
Autres	481,0
Mondial	602,0

Source: FAOSTATS 2002.

Figure 1. Distribution de la production mondiale de maïs



Source: Reproduit de « Maize Seed Industries in Developing Countries, 1998. Ed M. Morris », avec la permission du CIMMYT; données datant du début des années 1990.

Parmi les 10 plus grand producteurs de maïs se trouvent trois pays industrialisés (USA, France et Italie) qui ensemble produisent plus de 40% de la production mondiale ; trois pays asiatiques, (Chine, Inde et Indonésie) qui produisent un quart de la production mondiale de maïs ; trois pays d'Amérique Latine (Brésil, Mexique et Argentine) qui représentent plus de 10 % et finalement l'Afrique du Sud sur le continent africain qui produit entre 1 et 2 % de la production mondiale de maïs.

Le top 25 des pays producteurs de maïs dans le monde, répertoriés par région de culture, rendement et production sont indiqués dans la table 3 – ces pays comptent pour au moins 85% de la superficie mondiale cultivée avec du maïs et 95% de la production mondiale. Deux pays se détachent nettement en termes de superficie et de production, les USA avec 28,5 millions d'hectares et une production de 228,7 millions de tonnes ainsi que la Chine avec 24,5 millions d'hectares et une production de 124,2 millions de tonnes. Ensemble, ces deux pays, un pays industrialisé d'Amérique du Nord et un pays en voie de développement d'Asie, le plus peuplé du monde, représentent au moins 40% de la superficie mondiale de maïs et 60% de la production mondiale de maïs. Le rendement est plus élevé aux USA (8 tonnes/hectare) qu'en Chine (5,1 tonnes/hectare). Le troisième plus grand producteur mondial est le Brésil situé en Amérique Latine avec 11,8 millions d'hectares et une production de 35,5 millions de tonnes avec un rendement de seulement 3 tonnes/hectare. Huit pays produisent plus de 10 millions de tonnes. Enumérés par ordre décroissant ce sont les USA, la Chine, le Brésil, le Mexique, la France, l'Argentine, l'Inde et l'Italie. Parmi le Top 25 des pays producteurs de maïs, il convient de noter que seul huit d'entre eux sont industrialisés ou ont des économies de transition – USA, Roumanie, France, Ukraine, Yougoslavie, Canada, Italie et Hongrie - et 17 sont des pays en voie de développement : parmi eux, 9 sont situés en Afrique - Afrique du Sud, Nigeria, Ethiopie, Kenya, Tanzanie, Malawi, Congo, Mozambique et Zimbabwe ; 5 se trouvent en Asie - Chine, Inde,

Indonésie, Philippines et Thaïlande ; et trois sont situés en Amérique Latine - Brésil, Mexique et Argentine.

En terme de productivité, sept pays ont des rendements de plus de 5 tonnes/hectare. L'Italie a le plus fort rendement avec 10,9 tonnes/hectare, suivie par la France avec 8,8 tonnes/hectare, les USA avec 8 tonnes/hectare, le Canada avec 6,8 tonnes/hectare, l'Argentine et la Hongrie avec 6 tonnes/hectare et la Chine avec 5,1 tonnes/hectare.

3.2 Exportations et Importations de maïs

En 2001, les exportations mondiales de maïs étaient de l'ordre de 80 millions de tonnes, évaluées à 9-10 milliards de \$ en se basant sur le prix international actuel de 108 \$/tonne. Les USA sont de loin le plus grand exportateur avec 47 millions de tonnes, suivi par l'Argentine (11 millions de tonnes), la France (6 millions de tonnes) et la Hongrie (2 millions de tonnes). Le seul exportateur important du tiers-monde est l'Argentine qui exporte environ 11 millions de tonnes.

En termes d'importations, le seul importateur important dans le monde industrialisé est le Japon avec 16 millions de tonnes. Parmi les pays avec des économies de transition, la Corée du Sud importe environ 8 millions de tonnes. En Amérique Latine, le Mexique continue à compter sur les importations de 5 millions de tonnes par an alors que la Colombie importe seulement 2 millions de tonnes. En Asie, la Chine et la Malaisie ont une importation nette de 2 millions de tonnes. Dans le Moyen Orient, l'Egypte importe 3 millions de tonnes. Pour les pays en voie de développement, la balance commerciale du maïs est négative, mais elle devrait augmenter régulièrement, dans les trois continents du sud - Asie, Amérique Latine et Afrique. L'Asie a le déficit le plus important. Elle est suivie par le WANA (Asie de l'ouest et nord de l'Afrique) puis par l'Amérique Latine et l'Afrique.

Table 3. Superficies de maïs, rendement et production des pays du Top 25 des producteurs de maïs en 2002

Pays	Hectares récoltés (Millions)	Rendement (tonnes/ hectare)	Production (millions de tonnes)
1. USA	28,5	8,0	228,7
2. Chine	24,5	5,1	124,2
3. Brésil	11,8	3,0	35,5
4. Mexique	8,0	2,4	19,0
5. Inde	6,2	1,9	12,0
6. Nigeria	4,2	1,3	5,4
7. Afrique du Sud	3,3	2,7	9,1
8. Indonésie	3,3	2,8	9,3
9. Roumanie	2,9	2,9	8,5
10. Philippines	2,4	1,8	4,3
11. Argentine	2,4	6,0	14,7
12. France	1,8	8,8	16,0
13. Ethiopie	1,7	1,8	3,1
14. Kenya	1,5	1,8	2,7
15. Malawi	1,5	1,1	1,6
16. Tanzanie	1,5	1,7	2,5
17. Congo	1,4	0,8	1,1
18. Ukraine	1,3	3,2	4,2
19. Mozambique	1,3	0,9	1,1
20. Yougoslavie	1,2	4,6	5,5
21. Canada	1,2	6,8	8,2
22. Thaïlande	1,1	3,5	3,9
23. Italie	1,0	10,9	11,6
24. Hongrie	1,0	6,0	6,0
25. Zimbabwe	1,0	0,8	0,8
Sous-total	116,0 (84%)		539,0 (95%)
Autres	22,9		63,0
TOTAL MONDIAL	138,9 (100%)		602,0 (100%)

Source: FAOSTATS 2002.

3.3 Fermiers : Nombre de fermes et distribution au niveau mondial

On estimait qu'il y avait presque 200 millions de fermiers cultivant du maïs dans le monde, ce qui est équivalent, au niveau mondial, au nombre de fermiers cultivant du riz. Sur les 200 millions de fermiers cultivant du maïs dans le monde, 98%, soit environ 195 millions, cultivaient le maïs dans des pays en voie de développement et moins de 5 millions, soit environ 2%, produisaient du maïs dans

des pays industrialisés (table 4). Il n'existe pas d'ensemble de données statistiques complet publié qui donne des informations sur le nombre et la distribution des fermiers cultivant le maïs au niveau mondial. Les informations de la table 21 sont seulement des indications qui permettent de comparer les ordres de grandeur entre pays. Les informations ont été étayées par différentes sources en ce qui concerne les estimations pour le Top 25 des pays producteurs de maïs. Les données comprennent les informations du Département des

Statistiques Agricoles pour quelques pays, le FAO Agriculture Census de 1990 et dans les quelques cas, où les informations n'étaient pas disponibles, des estimations ont été réalisées à partir des pays voisins pour lesquels la taille et la distribution des fermes cultivant du maïs étaient très probablement similaires.

En terme de distribution régionale, parmi les 200 millions de fermiers cultivant du maïs dans le monde, environ 150 millions se trouvent en Asie, soit plus de 75 % de la quote-part mondiale (Table 5), entre 15 et 20% en Afrique, soit presque 35 millions de fermiers, moins de 5% chacune pour l'Amérique latine et l'Europe et moins de 1% en Amérique du nord (USA et Canada) ce qui représente actuellement 22% des 140 millions d'hectares mondiaux sur lesquels sont produits environ 40% des 600 tonnes de la production mondiale de maïs.

La Chine a, de loin, le plus grand nombre de fermiers cultivant le maïs avec 105 millions, soit la moitié des fermiers cultivant le maïs dans le monde, sur un domaine de maïs moyen de 0,23 hectares, ce qui est la plus petite taille de tous les pays. La distribution des fermiers cultivant le maïs et des superficies de maïs par région en Chine est donnée dans la table 6. Le plus grand nombre de fermiers cultivant le maïs en Chine se situe dans la région de la Rivière Jaune (38,9 millions) suivi par le sud-ouest (30,7 millions) et le plus petit nombre dans le nord-ouest (4,8 millions). Les plus petites exploitations de maïs cultivées par un fermier sont situées dans le sud et le sud-ouest (0,13 hectares) et les plus grandes dans le nord-est (0,69 hectares) et le nord (0,46 hectares).

Dans les trois pays - Chine (105 millions), Inde (12,5 millions) et Indonésie (6,1 millions), il y a un total de presque 125 millions de fermiers qui cultivent le maïs soit les deux tiers des fermiers du monde. En Afrique, le Nigeria, le pays le plus peuplé sur le continent avec une population de 124 millions de personnes, a de loin le plus grand nombre de fermiers cultivant le maïs avec un total de 8,5 millions, suivi par le Kenya, le Malawi et l'Éthiopie,

chacun avec au moins 3 millions de fermiers cultivant le maïs ; le Congo, la Tanzanie, le Mozambique et le Zimbabwe qui en ont chacun entre 2 et 3 millions. Le continent africain a entre 15 et 20% des fermiers mondiaux cultivant du maïs dans leur ferme sur une moyenne d'environ 0,5 hectares de maïs.

Dans quelques pays en voie de développement, il y a de grandes superficies de maïs cultivées par un petit nombre de grands fermiers et une petite superficie cultivée par un grand nombre de fermiers de subsistance. Par exemple, en Afrique du Sud, il y a 8 à 10'000 grands fermiers (estimation) qui cultivent une superficie totale de maïs de 3,2 millions d'hectares avec une exploitation moyenne de maïs par fermier de 320 hectares. De plus, il y a 250'000 fermiers de subsistance (estimation) qui cultivent 500'000 hectares de maïs avec une moyenne de 2 hectares de maïs par exploitation. L'Argentine en Amérique Latine aurait une distribution similaire en terme d'exploitation avec une grande proportion de la superficie de maïs constituée par 31'000 grands fermiers et un supplément de 65'000 petits fermiers (Table 4). Au Kenya, il y a 1'000 grands fermiers et 3,5 millions de petits fermiers. En France, il y a 30'000 fermiers commerciaux (estimation) cultivant du maïs et plus de 200'000 petites exploitations cultivant du maïs. De manière similaire, en Italie, il y a 20'000 fermiers commerciaux (estimation) cultivant du maïs avec environ 250'000 de petites exploitations cultivant du maïs.

L'Amérique latine représente moins de 5% des fermiers cultivant du maïs dans le monde. Les pays clés sont le Brésil, l'Argentine et le Mexique. Il y a de nombreux pays dans la région des Andes et en Amérique centrale où des petits fermiers de subsistance ont des petites exploitations de maïs. L'Argentine a les plus grandes exploitations de maïs (25,00 hectares) de l'Amérique latine soit 35 fois la superficie moyenne des exploitations du Mexique (1 hectare) où le système ejido caractérise les petites exploitations tenues par un grand nombre de petits exploitants agricoles. Le Brésil, qui a les plus grandes superficies de maïs d'Amérique Latine avec 11,8 millions d'hectares a environ 2,5 millions de

Table 4. Nombre de fermiers cultivant le maïs dans le monde et moyenne de la superficie de maïs par ferme

Pays/Région	Superficie de maïs (en millions d'ha)	Nombre de fermiers cultivant du maïs (en millions)	Superficie moyenne des cultures de maïs par ferme (en ha)
USA ²	28,5	0,430	66,27
Chine ²	24,5	105,000	0,23
Brésil ²	11,8	2,540	4,65
Mexique ²	8,0	2,750	1,06
Inde ¹	6,2	12,474	0,49
Nigéria ³	4,2	8,400	0,50
Afrique du Sud ²	3,3	0,260	12,60
Indonésie ¹	3,3	6,177	0,53
Roumanie ³	2,9	1,450	2,00
Philippines ¹	2,4	1,771	1,35
Argentine ¹	2,4	0,096	25,00
France ¹	1,8	0,257	7,00
Ethiopie ³	1,7	3,400	0,50
Kenya ²	1,5	3,500	0,43
Malawi ³	1,5	3,000	0,50
Tanzanie ¹	1,5	2,216	0,69
Congo RD ³	1,4	2,800	0,50
Ukraine ³	1,3	0,650	2,00
Mozambique ³	1,3	2,600	0,50
Yougoslavie ³	1,2	0,600	2,00
Canada ¹	1,2	0,027	44,44
Thaïlande ¹	1,1	0,428	2,57
Italie ¹	1,0	0,473	2,11
Hongrie ³	1,0	0,500	2,00
Zimbabwe ²	1,0	1,500	0,70
TOTAL	116,0	162,435	0,71
Total Mondial	140,0	196,042	0,71

Source: FAOSTATS 2002.

fermiers (estimation) qui ont une exploitation moyenne de 4,6 hectares. L'Europe, avec environ 2% des fermiers cultivant du maïs, a environ 3-4 millions de fermiers cultivant le maïs sur des exploitations variant de 2 hectares/ferme en Italie et en Hongrie à 7 hectares/ferme en France. Finalement, en Amérique du nord, les USA et le Canada ont seulement un total d'environ de 450'000 fermiers, moins de 1% du total mondial, qui exploitent des superficies de 44 hectares au Canada et de 66 hectares aux USA. En terme d'exploitation

Table 6. Nombre de fermiers cultivant du maïs dans le monde, exprime en % par région

Asie	77%
Afrique	17%
Amérique Latine	3%
Europe	2%
Amérique du Nord	1%
	100%

Source: Reassemblé par Clive James, 2003.

Table 6. Nombre de fermiers cultivant le maïs (en millions) en Chine, par région et superficie moyenne de maïs (en hectares) par ferme

Région	Nombre de fermiers cultivant du maïs (en millions)	Superficie moyenne des cultures de maïs/ferme (en hectares)	Superficie de maïs/région (en millions d'hectares)
Région de la Rivière Jaune/Huai	38,9	0,19	7,4
Sud-ouest	30,7	0,13	4,0
Sud	13,6	0,13	1,8
Nord-est	10,7	0,69	7,4
Nord	6,3	0,46	2,9
Nord-ouest	4,8	0,27	1,3
TOTAL	105,0	0,24	24,8

Source: Académie Chinoise des Sciences, communication personnelle 2003

moyenne de maïs, les plus grandes superficies sont exploitées aux USA (66 hectares/ferme), suivie par le Canada (44 hectares/ferme), l'Argentine (25 hectares/ferme) et l'Afrique du Sud (12 hectares). Ce sont les seuls pays qui ont des exploitations de maïs dont la superficie moyenne par ferme est de plus de 10 hectares. Dans la catégorie suivante, se trouvent plusieurs pays européens dont les exploitations de maïs ont des superficies qui varient de 2 hectares pour l'Italie ou la Hongrie à 7 hectares pour la France. Les petites exploitations sont la règle en Afrique et en Asie, et dans la plupart des pays d'Amérique latine (l'Argentine et le Brésil sont des exceptions) où les tailles des exploitations de maïs sont de 1 hectare (Mexique) ou moins. Les exploitations de maïs dans les pays africains ont une taille moyenne de 0,5 hectares (table 4).

Sur une base mondiale, on estime qu'entre 200'000 et 250'000 fermiers bénéficient actuellement du maïs Bt dans les pays où il a été déployé de façon commerciale (USA, Canada, Argentine, Afrique du Sud, Espagne, Honduras et Philippines). L'autorisation et l'adoption du maïs Bt en Chine seulement sur 25% des superficies cultivées avec du maïs dans les cinq prochaines années pourraient augmenter le nombre des bénéficiaires des 250'000 actuels d'un facteur 100 à 25 millions, dont un très fort pourcentage serait des petits exploitants

agricoles à faibles ressources qui auraient une chance de bénéficier de façon importante de la technologie.

4. Systèmes de production du maïs et germplasm du maïs

4.1 Systèmes de production du maïs

Le Centre International pour l'Amélioration du Maïs et du Blé (CIMMYT) au Mexique a classé les régions de culture du maïs en 4 méga-environnements (Table 7):

- Plaines tropicales
- Zones tropicales de moyenne altitude et subtropicales
- Zone montagneuses tropicales
- Zones tempérées

Ces méga-environnements sont définis selon des critères climatiques, comme la température moyenne durant la saison de culture du maïs, l'altitude et la longueur du jour. Mondialement, les superficies cultivées avec du maïs dans les zones tropicales et tempérées sont égales, 70 millions d'hectares chacune, soit un total mondial de 140 millions d'hectares (table 7). Plus de 90 % du maïs produit dans les pays industrialisés est cultivé dans les zones

Table 7. Superficies de maïs cultivées dans les 2 méga-environnements

Région	Méga-environnements				Total
	Plaines tropicales	Zone Subtropicale	Zone Montagneuse	Plaines tropicales	
Pays en voie de développement					
Amérique latine	19	4	4	2	2
Sub-Sahara	12	8	2	-	-
Asie (est/sud-est)	9	4	<1	21	21
Asie du sud	5	2	1	-	-
WANA	-	1	-	1	1
SOUS-TOTAL	45	19	7	24	24
Pays Industrialisés					
Amérique du nord	-	<1	-	30	30
Europe de l'ouest	-	-	-	-	-
Europe de l'est	-	-	-	-	-
SOUS-TOTAL	-	1	-	10	10
TOTAL MONDIAL	44	19	7	70	70

Source: CIMMYT 2000 modifié par Clive James

tempérées, alors que la proportion est de seulement 25 % des pays en voie de développement, majoritairement en Chine et en Argentine. Sur les 70 millions d'hectares de maïs produits dans les environnements tropicaux, environ 65% sont cultivés dans les tropiques, 25% dans les zones subtropicales/moyenne altitude et environ 10% dans les zones montagneuses tropicales (table 7) (CIMMYT 2000).

En général, la production commerciale de maïs, par opposition à la culture de subsistance, dans le tiers-monde concerne le secteur de l'alimentation animale plutôt que celui de l'alimentation humaine. Le secteur commercial dans les pays en voie de développement pourrait tenir compte de la future augmentation attendue. Le secteur privé, tant national qu'international, pourrait accélérer sa réaction afin de répondre à ces besoins si on lui fournit un accès plus important, via les programmes nationaux, à l'offre de germplasmes de maïs amélioré, y compris les caractères GM, et des

prestations de services allant de la distribution des semences à la fourniture d'apports extérieurs ainsi que le soutien technique. C'est le secteur maïs-alimentation humaine dans les pays en voie de développement qui présente le défi le plus important car la majorité des fermiers tropicaux cultivant du maïs continuent de rencontrer des contraintes importantes en cultivant assez de maïs pour répondre à leurs besoins de subsistance. Environ les deux-tiers du maïs tropical est semé avec des graines améliorées, le reste des semis se faisant avec des variétés locales ou traditionnelles.

Les données de la table 28 indiquent clairement qu'il y a un énorme 'écart de rendement' entre les rendements actuels et les rendements potentiels au niveau de la ferme qui ne peut pas être exploité dans les pays en voie de développement où, même le meilleur germplasmes amélioré de manière conventionnelle ne possède pas le degré nécessaire de tolérance aux stress biotiques résultant des dommages causés par les chenilles foreuses ou les

Table 8. Rendements actuels ou potentiels (tonnes/hectare) dans les pays en voie de développement

Région	Zone Tropicale		Zone Subtropicale		Zone Montagneuse	
	Actuel	Potentiel	Actuel	Potentiel	Actuel	Potentiel
Asie E/SE	2,2	5,5	3,0	8,7	3,5	5,0
Asie Sud	1,4	4,5	2,6	7,0	0,7	5,0
Asie ouest/Afrique N	-	-	3,2	4,5	-	-
Sub Sahara	0,7	4,5	2,5	7,0	0,6	5,0
Amérique latine/Caraïbes	1,5	5,0	4,0	10,0	1,1	6,0

Source: CIMMYT 2000.

autres insectes nuisibles. Les gènes comme le gène Bt peuvent, de façon efficace, apporter une résistance aux nuisibles clefs et aider à réduire cet écart de rendement.

4.2 Zones mondiales semées avec des hybrides, des variétés à pollinisation ouverte (OPV) et des semences sauvegardées par les fermiers

Les germplumes de maïs utilisés et préférés par les fermiers cultivant du maïs à travers le monde se regroupent en plusieurs classes. Les germplumes vont des races locales, traditionnelles utilisées par les fermiers de subsistance, aux variétés et aux populations à pollinisation ouverte sélectionnées utilisées par les fermiers plus modernes, aux hybrides utilisés par les fermiers les plus progressistes dans les pays en voie de développement et qui sont considérés comme la norme dans les pays industriels. Les données de la table 9 montrent les zones semées avec des maïs hybrides, des variétés à pollinisation ouvertes (aussi classées collectivement comme semences améliorées), par opposition aux semences gardées par les fermiers qui comprennent les races locales et les germplumes traditionnels utilisés par les fermiers de subsistance dans les pays en voie de développement.

Il convient de noter que sur une base mondiale, 80% de la superficie mondiale du maïs (140 millions

d'hectares) sont semés avec des variétés améliorées dont les deux tiers environ sont des hybrides, avec pour le reste, 13 % d'OPV et seulement 20% de semences conservées par le fermier ; ces dernières étant semées par des fermiers de subsistance dans les pays en voie de développement. Dans les pays industrialisés, 94% des superficies sont semées avec des hybrides et le reste de 6% avec des OPV, aucun fermier ne conserve de semences. Dans les pays en voie de développement, il est encourageant de voir que 70% des zones de maïs sont semées avec des variétés améliorées (54% avec des hybrides et 16% avec des OPV) et 30% semées avec des semences conservées par le fermier. Par conséquent, il y a presque 68 millions d'hectares de maïs qui sont semés avec des semences améliorées dans les pays en voie de développement. C'est une situation encourageante parce que une zone importante est cultivée avec des semences améliorées pouvant être du germplume amélioré de maïs, y compris les caractères comme le gène Bt qui confère une résistance aux chenilles foreuses, une contrainte importante pour augmenter la productivité. Il est remarquable qu'en Afrique de l'est et du sud, 92 % des superficies de maïs soient semées avec des variétés améliorées, principalement des hybrides. En fait, six des régions énumérées - est de l'Asie, est et sud de l'Afrique, ouest de l'Asie, le Cône méridional d'Amérique du Sud et la région des Andes en Amérique du Sud, Sud-est de l'Asie, sèment plus de 70% de variétés améliorées de maïs, dont la majorité sont des hybrides par opposition aux OPV. Le sud de l'Asie et le nord de l'Afrique sèment des quantités égales de semences améliorées et de semences

Table 9. Zones semées avec des maïs hybrides, des variétés à pollinisation ouverte (OPV) et des semences gardées par le fermier dans les régions des pays industrialisés et des pays en voie de développement en 1999

Région	Superficie récoltée	Région avec des Hybrides (%)	Régions avec des OPV (%)	Améliorés [Hybrides + OPVs] (%)	Semences conservées par le fermier (%)
Asie Est (Chine)	25,6	21,5 (84)	1,7 (6)	23,2 (90)	2,5 (10)
Afrique de l'est et du sud	15,4	12,5 (81)	1,7 (11)	14,2 (92)	1,2 (8)
Asie de l'ouest	1,1	0,7 (67)	0,2 (15)	0,9 (82)	0,2 (18)
Cône méridional d'Amérique du Sud	15,5	9,6 (62)	1,9 (12)	11,5 (74)	4,0 (26)
Région des Andes	2,1	0,9 (43)	0,6 (27)	1,5 (70)	0,6 (30)
Asie du sud-est	8,2	2,8 (35)	3,1 (36)	5,9 (71)	2,3 (29)
Asie du sud	8,1	2,4 (30)	2,0 (24)	4,4 (54)	3,7 (46)
Mexique et Amérique centrale	9,6	1,4 (15)	0,7 (8)	2,2 (23)	7,4 (77)
Nord de l'Afrique	1,2	0,1 (9)	0,4 (38)	0,5 (47)	0,7 (54)
Afrique de l'ouest et du centre	9,2	0,1 (4)	3,0 (32)	3,1 (33)	6,1 (67)
Total pour les pays en voie de développement	96,0	52,0 (54)	15,3 (16)	67,4 (70)	28,7 (30)
Ouest de l'Europe	4,5	4,3 (98)	0,2 (2)	4,5 (0)	0,0
Est de l'Europe	9,6	7,2 (75)	2,4 (25)	9,6 (100)	0,0
USA/Canada	30,0	30,0 (100)	0,0	30,0 (100)	0,0
Total pour les pays industrialisés	44,1	41,5 (94)	2,6 (6)	44,1 (100)	0,0
MONDE	140,0 (100%)	93,5 (67%)	17,9 (13%)	111,5 (80%)	28,7 (20%)

Source: CIMMYT, 2000. Modifié à partir de « World Maize Facts and Trends », avec les nouvelles estimations pour l'Europe de l'est

conservées par le fermier. C'est seulement dans deux régions, Amérique centrale (Mexique) et Afrique du centre ouest, qu'environ 70% des superficies de maïs sont semées avec des semences conservées par des fermiers qui pratiquent une agriculture de subsistance. La conclusion saillante des informations de la table 26 est que contrairement à la rhétorique de quelques critiques de la biotechnologie, une grande communauté des fermiers du tiers-monde, cultivant 70% de la superficie de maïs, a déjà adopté des variétés améliorées, principalement des hybrides et pourrait donc avoir accès au maïs Bt via le même réseau d'approvisionnement. Que les fermiers des pays en voie de développement utilisent seulement des graines conservées par eux-mêmes et n'auraient, par

conséquent, pas accès aux nouvelles technologies fournies via les hybrides est une idée fautive comme cela est montré par les preuves présentées dans la table 26. Par exemple, en Chine seule, il y a 105 millions de fermiers cultivant un quart d'hectare de maïs en moyenne, dont 90% achètent déjà des semences améliorées avec 84% d'entre eux achetant tous les ans des semences hybrides à cause des gains élevés qu'elles procurent.

4.3 Types de grains de maïs

Les grains de maïs sont regroupés en deux principaux types selon leur couleur et leur dureté – le maïs jaune est utilisé pour l'alimentation animale

et le blanc pour l'alimentation humaine – dureté, les grains à grains dentés qui sont durs et brillants, et les grains vitreux, qui sont opaques avec de l'amidon souple plutôt que dur. Environ 85% du maïs mondial est jaune, 10-12% blanc, le reste est composé de grains rouges, bleus, violets et noirs. Dans les pays où le maïs est l'aliment de base majeur, le maïs blanc est utilisé pour l'alimentation humaine et le jaune pour l'alimentation animale. La dureté est associée avec les grains dentés qui ont des grains pleins d'amidon et une surface brillante. Par contraste, les grains vitreux contiennent de l'amidon souple qui après dessiccation et réduction produit une surface concave, d'où le nom, et une apparence opaque. Environ 80% de la production mondiale de maïs est vitreux ou semi-vitreux, 15% dentés ou semi-dentés et le reste est composé de maïs farineux, caractéristique de la région des Andes, et du maïs cireux/ferme utilisé en Chine. Quel que soit le type de grain, jaune ou blanc, dentés ou vitreux, les grains sont génétiquement et nutritionnellement les mêmes, sauf pour le pigment ou la forme du grain.

5. Utilisation du maïs

Il existe des différences marquées dans l'utilisation du maïs entre les pays industrialisés et ceux en voie de développement. Dans les pays industrialisés, plus des trois quarts des grains de maïs sont mangés par les animaux, principalement le bétail, les porcs et la volaille, et le reste est destiné à des utilisations industrielles comme la production d'amidon, d'édulcorant et d'éthanol. Aux USA et en Europe, environ la moitié des grains de maïs produits sont conservés par les fermiers pour nourrir les animaux de leur propre ferme. Le reste est vendu à l'industrie du maïs, qui le traite pour produire des aliments pour les animaux ou l'utilise dans différents processus d'extraction afin de produire des produits industriels. La mouture par voie humide consomme une proportion importante du maïs américain et elle est utilisée pour la fabrication d'amidon, dont plus de 90% est converti en édulcorant. La mouture par voie humide donne des produits dérivés qui comprennent les protéines et les suppléments de fibres utilisés dans l'alimentation animale. Cela

comprend la farine de gluten et l'alimentation animale, la farine de germe et l'eau de trempage, qui peut être utilisé comme un milieu de culture pour *Penicillium* et d'autres organismes produisant des antibiotiques. La mouture par voie sèche, qui est un processus complètement différent, est utilisée sur seulement 2% environ du maïs américain afin de préparer une gamme d'ingrédients de produits alimentaires, y compris les gruaux et les farines de maïs, les produits pour l'alimentation animale et les utilisations industrielles. En Amérique centrale, le maïs est utilisé pour préparer les tortillas qui sont l'aliment traditionnel de pays comme le Mexique. Le maïs est aussi utilisé comme une farine composite pour « augmenter » et supplémer la farine de blé. La farine composite est utilisée tant au Zimbabwe qu'en Zambie et elle a un potentiel dans beaucoup d'autres pays en voie de développement. Finalement, la fermentescibilité de l'amidon de maïs et des édulcorants en fait des produits appropriés pour la production de boissons alcooliques ainsi que pour la production de l'éthanol qui servira à rallonger l'essence dans la proportion de 10% d'éthanol pour 90% d'essence. Dans les années 1990, environ 10 millions de tonnes de maïs étaient annuellement utilisées pour la production d'éthanol aux USA. En terme de future tendance, et des préoccupations concernant la fabrication d'énergie ne provenant plus de combustibles fossiles non-renouvelables, la production d'éthanol à partir de maïs est susceptible de se voir attribuer une forte priorité et pourrait voir une croissance significative à moyen terme. Les données de la table 10 détaillent les utilisations du maïs en termes de kg/tête/an et le pourcentage d'utilisation comme aliment humain, aliment animal ou autres utilisations. Sur une base mondiale, l'utilisation du maïs par tête est de 94 kg/an avec 22% qui sont utilisés pour la consommation humaine, 63% pour l'alimentation animale et les 15 % restants pour d'autres utilisations. La plus forte utilisation par tête dans se trouve dans les pays industrialisés avec 274 kg/an - 5 % pour la consommation humaine, 76% pour l'alimentation animale et 19 % pour les autres usages. L'utilisation de 274 kg de maïs par tête dans les pays industrialisés est en fort contraste avec l'utilisation dans les pays en voie de développement où la

Table 10. Utilisation mondiale du maïs 1992-1994

Région	Utilisation (kg/tête/an)	% alimentation humaine	% alimentation animale	% autres utilisations
Pays en voie de développement	60	38	51	11
Afrique	62	64	23	13
Asie	46	34	72	10
Amérique Latine	149	29	57	12
Pays Industrialisés	274	5	76	19
Monde	94	22	63	15

Source: Morris 1998. Modifié.

consommation par tête est inférieure des trois-quarts avec 60 kg/an. La consommation humaine dans les pays en voie de développement est 7 fois plus forte que dans les pays industrialisés avec 38 % contre 5 % ; l'utilisation pour l'alimentation animale est de 51% en comparaison avec 76 % et les autres utilisations représentent 11% comparé à 19%. En comparant les différents continents, l'utilisation par tête est la plus élevée en Amérique latine avec 149 kg/an comparativement au 62 kg/an pour l'Afrique et au 46 kg/an pour l'Asie. La consommation humaine est la plus forte en Afrique (64%) puis en l'Asie (34%) et en Amérique latine (29%).

L'utilisation pour l'alimentation animale est la plus élevée en Asie avec 72 % comparée avec les 57% de l'Amérique latine et seulement 23 % pour l'Afrique.

En terme de tendances futures, l'utilisation du maïs devrait augmenter bien que les taux de croissance soient différents dans les trois continents du sud. En Asie et en Amérique Latine, l'augmentation des revenus et de la demande de produits carnés va entraîner une augmentation de la consommation de maïs pour l'alimentation humaine alors qu'en Afrique les augmentations de revenus seront plus lentes, conduisant à une demande plus faible. Ces tendances sont discutées avec plus de détails dans la section suivante.

6. Demande de maïs en 1997 comparée avec les prévisions pour 2020

Les trois principales plantes de base - maïs, blé et riz - fournissent plus de 50% de nos besoins en calories sur une base mondiale et le maïs est la principale source d'alimentation pour les animaux. En 1997, la demande mondiale pour les trois principales plantes de base totalisait 1,5 milliards de tonnes comprenant une demande égale pour le maïs et le blé, 586 millions de tonnes pour le maïs et 585 millions de tonnes pour le blé et une demande plus faible pour le riz avec 381 millions de tonnes (riz blanchi) (table 11). La demande mondiale de céréales en 2020 est estimée à 2,1 milliards de tonnes (IFPRI 2003). Pour la première fois, on observera un changement important en faveur du maïs dont la demande est estimée à 852 millions de tonnes alors que celle du blé devrait être de 760 millions de tonnes et celle du riz de 503 millions, soit un total de 2,1 milliards de tonnes. Ainsi, la demande mondiale pour le maïs en 2020 augmentera de 45% (comparé à 30% pour le blé et 32% pour le riz), reflétant une croissance substantielle de 72% dans les pays en voie de développement alors qu'elle ne sera que de 18% dans les pays industrialisés. Cette augmentation de 72% de la demande pour le maïs dans les pays en voie de développement se compare à seulement 44% pour le blé et 33% pour le riz (table 11). Cette

Table 11. Prévisions des demandes de maïs, blé et riz, 1997 et 2020 (millions de tonnes)

Région	MAÏS			BLÉ			RIZ*		
	1997 Demande	2020 Demande	Variation (%)	1997 Demande	2020 Demande	Variation (%)	1997 Demande	2020 Demande	Variation (%)
Mondial	586	852	266 (45)	585	760	175 (30)	381	503	122 (32)
Pays Industrialisés	291	344	53 (18)	245	268	23 (9)	17	19	2 (9)
Pays en voie de développement	295	508	213 (72)	341	492	152 (44)	364	484	120 (33)

Source: IFPRI, 2003. * Riz blanchi

Table 12. Demande de maïs pour les pays en voie de développement en 1997 et en 2020 (millions de tonnes)

Région	Demande en 1997	Demande en 2020	Variation (%)
Est de l'Asie	136	252	116 (85%)
Amérique Latine	75	118	43 (57%)
Afrique Subsaharienne	29	52	23 (79%)
Sud-est de l'Asie	23	39	16 (70%)
WANA*	18	28	28 (56%)
Sud de l'Asie	14	19	5 (36%)

Source: IFPRI, 2003. * WANA - ouest de l'Asie et nord de l'Afrique

augmentation de la demande se traduit par 213 millions de tonnes de maïs entre 1997 et 2020 dans les pays en voie de développement. Elle sera seulement de 152 millions de tonnes pour le blé et de 120 millions pour le riz.

Parmi les pays en voie de développement, la plus forte augmentation de la demande de maïs en 2020 aura lieu dans les pays de l'est de l'Asie, avec, en tête, la Chine qui demandera 252 millions de tonnes, soit une augmentation de 85 % (table 12). L'augmentation suivante sera pour l'Afrique subsaharienne avec 79 % pour une demande de 52 millions de tonnes, suivie par le sud-est de l'Asie avec une croissance de 70 % soit 39 millions de tonnes, l'Amérique Latine avec 57 % soit une demande de 118 millions de tonnes, la région

WANA avec 56 % soit 28 millions de tonnes et finalement le sud de l'Asie avec 36 % soit une demande de 19 millions de tonnes en 2020 (Table 12). Parmi les pays industrialisés, le Japon est le principal importateur, avec actuellement plus de 15 millions de tonnes. Les importations devraient rester au même niveau en 2020.

En 2020, sur les 852 millions de tonnes de maïs nécessaires au niveau mondial, 69 % seront utilisées pour l'alimentation animale, 15 % pour l'alimentation humaine et 16 % seront destinés à des utilisations industrielles non-alimentaires (table 13). Alors que seulement 5 % du maïs sera utilisé à des fins alimentaires dans les pays industrialisés, 22 % le seront dans les pays en voie de développement (table 13). A l'intérieur des pays en voie de

Table 13. Demande et utilisation du maïs en 2020

Région	Superficie ¹	Demande ²	% alimentation humaine	% alimentation animale	% autre	Commerce net ³
Mondial	158	852	15 %	69 %	16%	
Pays Industrialisés	50	344	5 %	76 %	19%	+67
Pays en voie de développement	108	508	22 %	64 %	14%	-67
Est de l'Asie	30	252	4 %	82 %	14%	-43
Amérique Latine	32	118	25 %	60 %	15%	+5
Afrique Subsaharienne	26	52	76 %	10 %	14%	-6
Sud-est de l'Asie	9	39	32 %	58 %	10%	-8
WANA	2	28	28 %	63 %	9%	-14
Sud de l'Asie	9	19	70 %	13 %	17%	<-1

Source: IFPRI, 2003. ¹Millions d'hectares; ²Millions de tonnes; ³Millions de tonnes, exportation (+), importation (-).

développement, la plus forte proportion de maïs utilisée pour l'alimentation sera rencontrée dans les pays de l'Afrique sub-saharienne (76 %), suivie par le sud de l'Asie (70 %) qui comprend l'Inde, le Pakistan et le Bangladesh. Par opposition, les pays en voie de développement de l'est de l'Asie, principalement la Chine, utiliseront seulement 4 % du maïs pour l'alimentation humaine, 82 % pour l'alimentation animale et 14 % pour des autres utilisations. En terme de demande totale pour le maïs en 2020, on estime que l'est de l'Asie aura la plus forte demande en maïs (252 millions de tonnes). Ceci en comparaison avec les 227 millions de tonnes pour les USA, 118 millions de tonnes pour l'Amérique Latine, 52 millions de tonnes pour l'Afrique sub-saharienne et les 40 millions de tonnes pour les 15 pays de l'Union Européenne. Il y a actuellement deux grands exportateurs de maïs, les USA (avec actuellement 45 millions de tonnes et une prévision d'environ 70 millions de tonnes en 2020) et l'Argentine (actuellement 10 millions de tonnes et une prévision de 20 millions de tonnes en 2020). Les seuls nouveaux exportateurs significatifs en 2020 seront les pays de l'Europe de l'est, qui pourraient exporter jusqu'à 8 millions de tonnes (IFPRI 2003).

Le défi de produire 266 millions de tonnes

supplémentaires pour répondre une demande mondiale sans précédent qui totalisera 852 millions de tonnes de maïs en 2020 est redoutable. Le défi est même encore plus décourageant si l'on considère que plus de 80 % de l'augmentation de la demande de 266 millions de tonnes, soit 213 millions de tonnes, concernera les pays en voie de développement. De plus, seulement environ 10 % de ce surplus est susceptible d'être fourni via une augmentation des exportations des pays industrialisés vers les pays en voie de développement. Ce qui laisse à ces derniers le soin de produire eux-mêmes leurs propres besoins supplémentaires en maïs. Les principaux importateurs incluront l'est de l'Asie (43 millions de tonnes), le WANA (14 millions de tonnes), le sud-est de l'Asie (8 millions de tonnes) et l'Afrique sub-saharienne (6 millions de tonnes). Ainsi, la plupart des 213 millions de tonnes supplémentaires nécessaires aux pays en voie de développement, devra être produit dans des pays en voie de développement quasiment sur la même superficie de terre. La superficie mondiale de maïs ne devrait augmenter que de 12 %, passant de 140 millions d'hectares en 2000 à 158 millions d'hectares en 2020. Ainsi les 88 % d'augmentation de la production de maïs nécessaire devront être obtenus

via une augmentation de la productivité résultant de meilleurs rendements par unité de surface de terre. C'est un défi décourageant pour les fermiers du Tiers-Monde, qui sont, pour la plupart, des petits fermiers à faible revenus cultivant deux tiers (environ 100 millions d'hectares) de la superficie mondiale de maïs, avec un rendement moyen actuel de 2,8 millions de tonnes/hectare. Leur productivité actuelle doit être comparée aux 6,8 millions de tonnes/hectare dans les pays industrialisés, avec les plus forts rendements de plus de 8 millions de tonnes/hectare restreints aux USA et aux pays de l'Union Européenne. Ce sont les stress biotiques dus aux nuisibles qui limitent la production dans les pays en voie de développement. De manière similaire, les stress abiotiques dus à la sécheresse, la salinité, les sols acides et déficients ou la toxicité d'oligo-éléments limitent la productivité des grandes superficies dans les pays en voie de développement. Dépasser ces contraintes biotiques et abiotiques, via des applications conventionnelles ou des biotechnologies, permettrait aux germplasmés actuels du maïs de se déployer dans les pays en voie de développement ou industrialisés, entraînant des augmentations significatives de rendements.

Les changements de la demande mondiale de céréales en faveur du maïs reflètent l'augmentation des revenus dans beaucoup de pays en voie de développement qui entraîne des augmentations conséquentes dans la consommation de viande, donc une utilisation plus forte du maïs pour l'alimentation de la volaille et des porcs. La demande supplémentaire de maïs est particulièrement élevée en Asie de l'est où la demande devrait passer de 136 millions de tonnes en 1997 à 252 millions de tonnes en 2020. Parallèlement, en Afrique sub-saharienne, les fortes augmentations de population et la pauvreté généralisée devraient conduire à une forte demande de maïs comme source d'alimentation humaine. Ceci est aussi vrai pour l'Amérique et le sud de l'Asie. Par comparaison avec le niveau de 1997, la demande en maïs de l'Afrique sub-saharienne devrait presque doubler, passant de 29 millions de tonnes à 52 millions de tonnes en 2020. La demande en maïs pour l'alimentation humaine dans des pays comme le Mexique en Amérique Latine, devrait rester

élevée car le revenu augmente. La forte augmentation de la demande de maïs durant les 20 prochaines années est un défi pour les pays en voie de développement parce que les importations, qui ont généralement représenté 10 % des besoins des pays en voie de développement, ne devrait pas changer de façon significative (CIMMYT 2000). La quantité de maïs commercialisé devrait atteindre 67 millions de tonnes en 2020 soit une augmentation de 150 % par rapport au volume de maïs commercialisé en 1997. Ainsi, la seule possibilité pour les pays en voie de développement de répondre à leurs besoins en maïs est d'augmenter la productivité de maïs par unité de terre, dans les zones où la meilleure technologie a traditionnellement été un élément important. Dans les pays en voie de développement, spécialement les grands pays les plus avancés, la production commerciale de maïs est destinée à l'alimentation humaine. Dans ces pays, l'utilisation de la meilleure technologie conventionnelle, comme les hybrides, ainsi que les applications de la biotechnologie, devraient augmenter de façon importante la production. Par exemple, trois pays en voie de développement, l'Argentine, l'Afrique du Sud et les Philippines, ont déjà déployé le maïs Bt pour contrôler les différentes chenilles foreuses alors que le nuisible principal au Honduras est le légionnaire d'automne. La participation accrue de l'industrie des semences du secteur privée pourrait aider à répondre à la demande supplémentaire de grains en augmentant l'efficacité de la distribution des semences et, de cette façon, l'accès aux meilleures technologies. Augmenter la productivité du maïs pour l'alimentation humaine, un secteur dominé par les fermiers de subsistance, en utilisant la technologie venant du secteur public, est un défi important, spécialement en ce qui concerne l'introduction des améliorations provenant des applications de la biotechnologie. Cependant, le progrès a pu être réalisé dans des pays comme l'Afrique du Sud où le maïs Bt blanc pour l'alimentation humaine introduit en 2001, a été bien accepté, avec une augmentation des superficies d'un facteur 10 qui atteignaient presque 60'000 hectares en 2002.

7. Faire face à l'augmentation des demandes – le rôle du maïs Bt

Comme cela a été mentionné dans la section précédente, l'augmentation de la demande en maïs exigera une augmentation significative de la production tant dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement. Alors que les pays industrialisés ont la capacité d'augmenter de manière significative la production, le défi concernera les pays en voie de développement, particulièrement ceux du continent africain, qui ont un accès réduit aux meilleures technologies et des infrastructures précaires pour les mettre en oeuvre. Alors que la technologie ne sera qu'un des éléments d'une stratégie à orientations multiples que les programmes nationaux devront mettre en oeuvre pour augmenter la productivité du maïs, elle est néanmoins un élément clé dans toutes les stratégies. Quelques pays en voie de développement doivent faire face à des contraintes importantes y compris pour l'accès aux meilleures techniques conventionnelles et les nouvelles technologies représentent un défi encore plus grand. Cependant, le fait que la technologie GM soit incorporée dans la graine, fait des plantes GM une technologie très adaptée pour les petits fermiers, comme en témoignent les 5 millions de petits fermiers en Asie, en Amérique Latine et en Afrique qui ont déjà adopté le coton GM. Ces fermiers à faibles revenus sont d'accord de payer un supplément pour le coton Bt à cause des revenus plus élevés que cette technologie génère. Le maïs Bt offre aux petits fermiers en Asie, en Amérique Latine et en Afrique des avantages similaires à ceux du coton Bt à cause des gains de productivité qu'il offre ainsi que des faibles coûts des intrants. Le maïs Bt offre des avantages aux fermiers cultivant du maïs et aux consommateurs des pays industrialisés dans lesquels les nuisibles qui peuvent être contrôlés par le gène Bt, comme les chenilles foreuses et la chrysomèle des racines du maïs, sont courants et économiquement importants. Non seulement, le maïs Bt offre aux fermiers des avantages dans la productivité et la rentabilité, mais il offre aussi l'avantage très important de diminuer les niveaux de mycotoxines toxiques, l'élimination des insecticides

pour les nuisibles ciblés et la diminution de l'exposition des fermiers et de l'environnement aux insecticides. Ces trois attributs capitaux du maïs Bt offre des avantages importants pour les fermiers, l'environnement, les consommateurs et la société dans son ensemble.

8. Insectes nuisibles du maïs

Les insectes nuisibles du maïs sont une contrainte importante pour la production à cause des importantes pertes de gain et de la dégradation de la qualité des grains qu'ils causent. Les niveaux d'infestation des insectes nuisibles spécifiques varient énormément d'une année à l'autre et d'une région à l'autre, rendant difficile la caractérisation mondiale de leur distribution et de leur importance économique. Cependant, une relation entre la présence et l'importance d'insectes nuisibles spécifiques, les quatre méga-environnements et la géographie dans lesquels le maïs est cultivé existe (table 14). Les principaux insectes nuisibles dans chacun des quatre méga-environnements (tropical, sub-tropical, zones montagneuses et tempérées) sont énumérés dans la table 14. En général, les insectes nuisibles provoquent plus de dommages dans les environnements tropicaux que dans les tempérés parce que les conditions climatiques sont plus propices pour accélérer tant le développement des insectes que le nombre de générations. De plus, les générations se recouvrent partiellement ce qui conduit à des niveaux d'infestation et à des pertes élevés. Les dommages dus aux insectes se produisent du stade de la plantule (chenille de «ver-gris») via le stade végétatif, à la formation du grain et au stockage (charançons d'après récolte) – voir Figure 8 pour l'illustration des dommages causés par les insectes chez le maïs). Les insectes nuisibles causent des dommages chez le maïs cultivé de manière multiple. Les attaques des insectes sur toutes les parties de la plante tout au long de la saison de culture incluent : les épis (chenilles foreuses, vers de l'épi de maïs et légionnaire uniponctué) ; les tiges (chenilles foreuses) ; les feuilles (légionnaire uniponctué, aphides, chenilles foreuses, thrips, mites et sauterelles) ; les racines

(chrysomèles des racines du maïs, taupins et charançons); et finalement il existe des nuisibles d'après-récolte qui endommagent et consomment les grains dans les lieux de stockage (charançon des grains, grand capucin du maïs, pyrale indienne de la farine et alucite des céréales). Cependant ce chapitre se concentre sur les nuisibles que l'on trouve dans les champs, principalement sur les chenilles foreuses plutôt que sur les nuisibles que l'on rencontre dans les zones de stockage.

Chenilles foreuses

En tant que complexe de nuisibles, les chenilles foreuses sont les insectes nuisibles les plus importants et les plus répandus dans le monde. Elles seront le sujet principal de ce chapitre sur le maïs Bt. La distribution des principales chenilles foreuses qui endommagent le maïs est décrite dans la figure 9, qui représente la distribution mondiale de ce groupe d'insectes nuisibles très important. La protéine Bt confère une résistance contre ce groupe d'insectes.

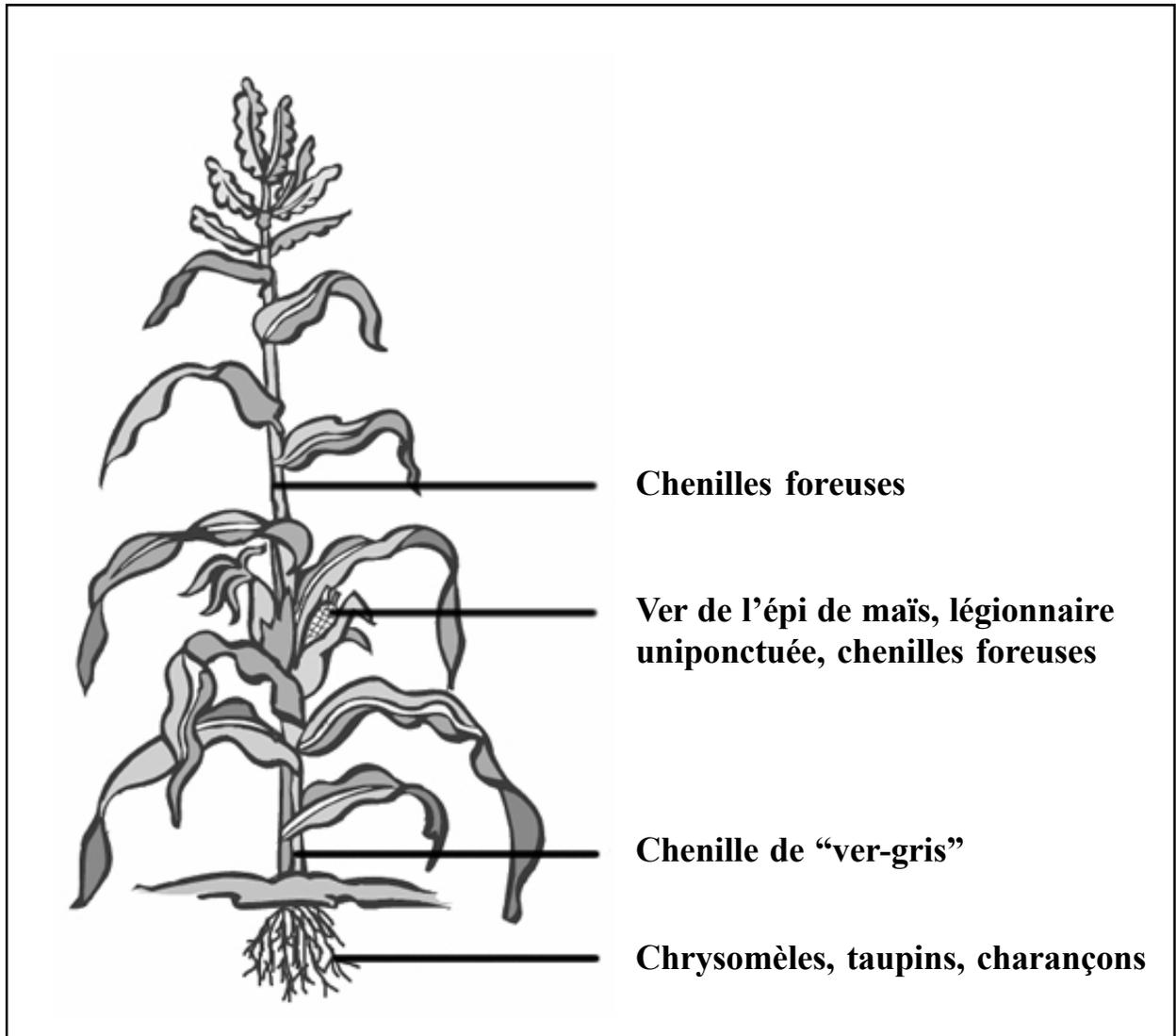
Les espèces les plus importantes d'un point de vue économique incluent la pyrale (*Ostrinia nubilalis*) présente en Amérique du Nord et en Europe avec quelques pays européens qui souffrent aussi de la sésamie (*Sesamia nonagroides*). En Amérique du nord, la pyrale du sud-ouest (*Diatraea grandiosella*) est aussi importante et en Amérique du sud, la pyrale de la canne à sucre (*Diatraea saccharalis* et *Eldana saccharina*) et dans une moindre mesure la pyralide (*Elasmopalpus lignosellus*) sont aussi des nuisibles importants. Les pyrales les plus importantes en Asie sont la pyrale asiatique (*Ostrinia furnacalis*), suivie par le foreur ponctué des graminées (*Chilo partellus*). Sur le continent africain la pyrale la plus importante est une noctuelle foreuse africaine (*Busseola fusca*) et le foreur ponctué des graminées (*Chilo partellus*), suivi par le foreur de tige (*Sesamia calamistis*) et la pyrale de la canne à sucre (*Eldana saccharina*). Les chenilles foreuses attaquent en premier les feuilles et à un stade plus avancé, elles forent les tiges et les pédoncules où elles interfèrent avec le mouvement de l'eau et des métabolites dans le système vasculaire. Elles causent

aussi des dommages entraînant la cassure des tiges et la chute des épis. Les infestations de chenilles foreuses diminuent significativement la fertilité et le rendement conduisant à des conséquences économiques sérieuses. De plus, les tissus de maïs endommagés par les foreurs permettent aux champignons, particulièrement les espèces de *Fusarium* de coloniser les tissus endommagés, conduisant à la pourriture sèche de l'épi (*Diplodia maydis*) et à la fusariose de l'épi (*Fusarium graminearum*) ainsi qu'à l'accumulation de mycotoxines toxiques. Les infections par des champignons peuvent résulter en un grain abîmé et toxique qui contribue aux risques alimentaires pour les humains et les animaux ; les mycotoxines seront traitées plus en détail dans la section 15.

Chrysomèles

Le complexe des chrysomèles des racines du maïs comprend deux espèces qui sont très importantes aux USA où 13 des 32 millions d'hectares sont infestés. Les deux espèces sont la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera, virgifera*) et la chrysomèle des racines du nord (*D. barberi*) (Metcalf and Metcalf 1993). Les chrysomèles sont aussi importantes au Canada, au Mexique, en Argentine et au Brésil. En Europe, la chrysomèle des racines du maïs a été détectée pour la première fois en Yougoslavie en 1992 et elle s'est répandue, durant la dernière décennie, dans les dix pays européens suivants : Hongrie, Bulgarie, Roumanie, Slovaquie, Italie, Suisse, Ukraine, Autriche, France et République Tchèque. En 2003, la chrysomèle s'est répandue plus loin aux Pays Bas, où le programme d'éradication était mis en œuvre (Plantenziektenkundige Dienst 2003) et au Royaume-Uni (DEFRA 2003). Ainsi, la chrysomèle a maintenant été détectée dans 13 pays européens. La figure 10 décrit la distribution internationale de cet insecte nuisible dont on estime qu'il a infesté 13 des 28,5 millions d'hectares de maïs récolté aux USA, 1 des 1,2 millions d'hectares de maïs au Canada, 1 des 8 millions d'hectares de maïs au Mexique, 5 des 11,8 millions d'hectares au Brésil et finalement 0,1 des 2,4 millions d'hectares en

Figure 2. Illustration des parties de la plante de maïs sur lesquelles les principaux insectes nuisibles causent des dommages



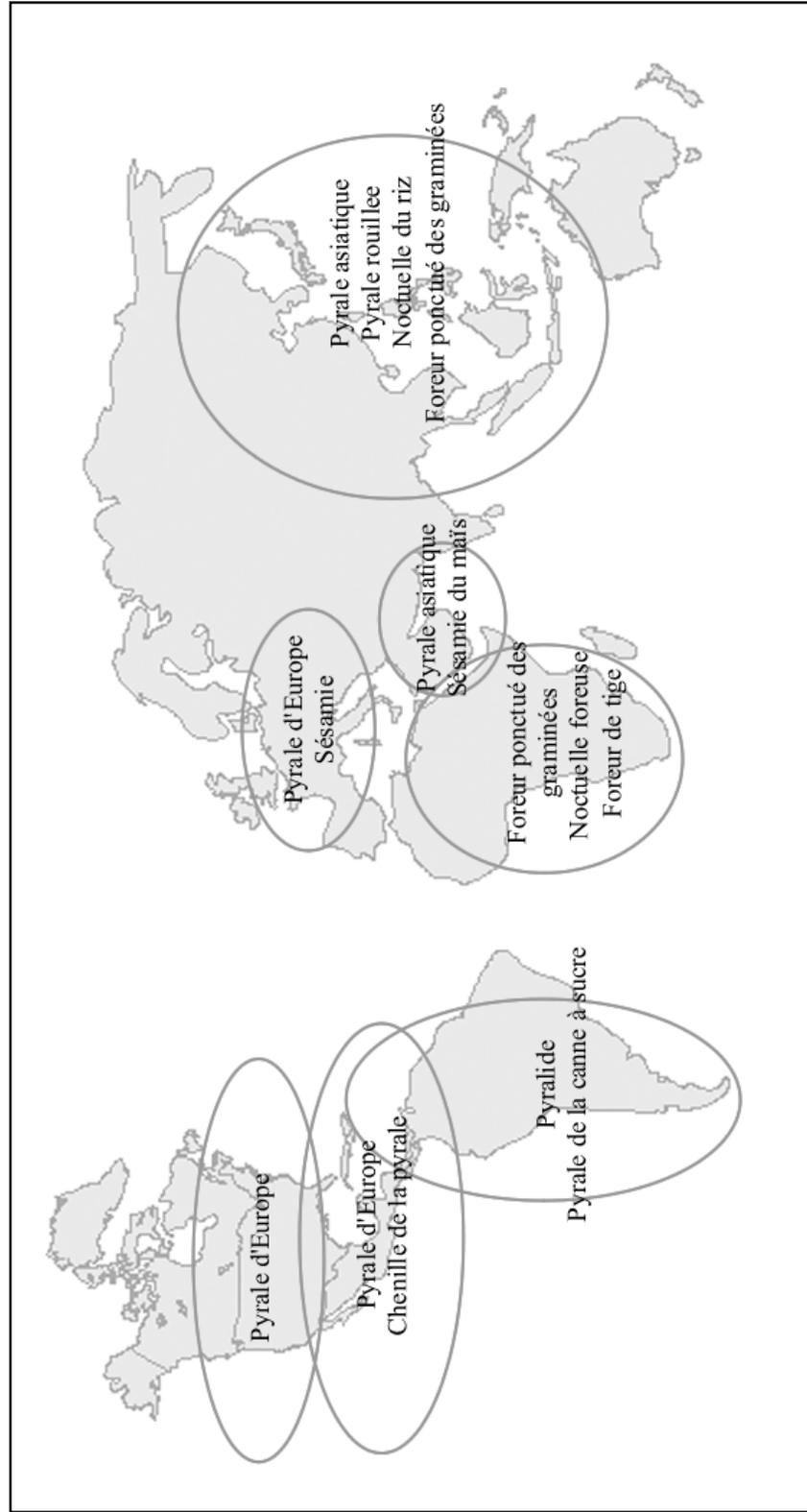
Source: Anonyme.

Table 14. Espèces d'insectes les plus importantes causant des pertes économiques dans les cultures de maïs des les méga-environnement tropicaux, sub-tropicaux, montagneux et tempérés

Nom commun	Nom scientifique	Régions atteintes
Environnements Tropicaux		
Chenilles foreuses		
Foreur ponctué des graminées	<i>Chilo Partellus</i>	Asie, est de l'Afrique
Pyrale asiatique	<i>Ostrinia furnacalis</i>	Asie
Pyralide du maïs	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>	Amériques
Noctuelle du sorgho	<i>Sesamia cretica</i>	Afrique
Foreur de tige africain	<i>Sesamia calamistis</i>	Afrique
Noctuelle foreuse africaine	<i>Busseola fusca</i>	Afrique
Pyrale de la canne à sucre	<i>Eldana saccharina</i>	Afrique
Pyrale rouillée	<i>Chilo suppressalis</i>	Asie
Noctuelle du riz	<i>Sesamia inferens</i>	Asie
Pyrale de la canne à sucre	<i>Diatraea saccharalis</i>	Amériques
Chenilles mineuses de la tige	<i>Diatraea lineolata</i>	Amérique du centre et du sud
Cicadelles	<i>Cicadulina spp.</i>	Afrique
Légionnaire (ou noctuelle) d'automne	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Amériques
Chenille de «ver-gris»	<i>Agrotis spp.</i>	Toutes les régions
Termites	<i>Microtermes spp.</i>	Afrique, Asie
Environnements Sub-tropicaux		
Chenilles foreuses		
Pyrale	<i>Ostrinia nubilalis</i>	Afrique du nord, Moyen-Orient
Pyralide du maïs	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>	Amériques
Pyrale asiatique	<i>Ostrinia furnacalis</i>	Asie
Foreur ponctué des graminées	<i>Chilo partellus</i>	Afrique
Noctuelle foreuse Africaine	<i>Busseola fusca</i>	Afrique
Pyrale de la canne à sucre	<i>Eldana saccharina</i>	Afrique
Pyrale de la canne à sucre	<i>Diatraea saccharalis</i>	Amériques
Pyrale d'Europe	<i>Diatraea grandiosella</i>	Amériques
Légionnaire (ou noctuelle) d'automne	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Amériques
Ver de l'épi de maïs	<i>Helicoverpa zea</i>	Amériques
Noctuelle (de la tomate)	<i>Helicoverpa armigera</i>	Afrique, Asie
Termites	<i>Microtermes spp.</i>	Afrique, Asie
Environnements Tempérés		
Pyrale d'Europe	<i>Diatraea grandiosella</i>	Amérique du nord
Pyrale de la canne à sucre	<i>Diatraea saccharalis</i>	Cône sud de l'Amérique latine, Amérique du sud
Pyralide du maïs	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>	Cône sud de l'Amérique latine, Amérique du sud, zone sud de l'Amérique du nord
Pyrale asiatique	<i>Ostrinia furnacalis</i>	Asie de l'est
Pyrale	<i>Ostrinia nubilalis</i>	Europe, Amérique du Nord
Chrysomèles	<i>Diabrotica spp.</i>	Amériques et Europe
Sésamie	<i>Sesamia nonagroides</i>	Europe & Méditerranée
Légionnaire (ou noctuelle) d'automne	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Amérique du Nord et du Sud
Ver de l'épi de maïs	<i>Helicoverpa zea</i>	Amérique du Nord, Sud
Noctuelle (de la tomate)	<i>Helicoverpa armigera</i>	Europe, Asie
Chenille de «ver-gris»	<i>Agrotis spp.</i>	Partout
Scarabées blancs	<i>Phyllospthaga spp.</i> <i>Cyclocephala spp.</i>	Amérique du Nord et du Centre
Environnements montagneux Tropicaux		
Ver de l'épi de maïs	<i>Helicoverpa zea</i>	Amériques
Chenilles de «ver-gris»	<i>Agrotis spp. y compris Ipsolan</i>	Partout

Source: Dowswell et al. 1996. Modifié par Clive James, 2003.

Figure 3. Distribution mondiale des pyrales du maïs.



Source: CIMMYT, Mexico

Argentine. Ainsi les chrysomèles américaines ont déjà infesté plus de 20 millions d'hectares. Les fermiers utilisent plus d'insecticide pour contrôler cet insecte nuisible aux USA que pour n'importe quelle autre nuisible des plantes cultivées : jusqu'à 80 % de tous les insecticides appliqués sur le maïs sont destinés à contrôler les chrysomèles (Oehme and Pickrell 2003, Cropposis 2003). En Europe, la superficie totale infestée par la chrysomèle était estimée à 100'000 hectares en 1997. Elle aurait atteint plus de 280'000 hectares maintenant. Ainsi, la chrysomèle a déjà été établie comme un nuisible mondial aux Amériques et elle a été détectée dans 13 pays en Europe où elle continue à se disséminer. Les larves se nourrissent sur les racines des plants de maïs et les dommages réduisent le flux d'eau et de métabolites dans le système vasculaire, conduisant à une diminution de la fertilité et de la récolte utilisable. Les tiges de maïs infestées tombent par terre et se cassent, entraînant des pertes importantes de récolte. Le maïs Bt commercialisé avec le gène *cry3Bb1* a été déployé pour la première fois aux USA en 2003. Il confère la résistance au grignotage de la chrysomèle.

Vers de l'épi de maïs

Les vers de l'épi de maïs (*Helicoverpa zea*) sont très répandus sur les maïs cultivés dans les Amériques de l'Argentine au sud jusqu'au Canada dans le nord. Les dommages peuvent avoir lieu dans les premiers stades mais de manière plus importante à la fin du stade d'émission des soies à un stade où les pertes de récolte peuvent être très importantes. Le *cry1Ab*, récemment déployé, fournit un contrôle efficace au premier stade de verticille mais seulement une réduction (50 à 80%) à un stade plus tardif.

Noctuelles

Les *Spodoptera* spp. peuvent causer des dommages sérieux car ils mangent les feuilles durant le stade de verticille, puis se nourrissent sur les épis plus tard dans la saison, mais ils pénètrent rarement dans les tiges. Le légionnaire d'automne (*S. frugiperda*) est

commun dans les Amériques où il est principalement contrôlé par l'application d'insecticides foliaires qui préviennent les dommages aux épis. Le maïs avec le gène Bt (*cry1Ab*) offre un contrôle efficace au stade de verticille mais le contrôle est seulement partiel au stade épi. Les nouveaux produits Bt devraient offrir un meilleur contrôle des vers ce qui rend ces produits particulièrement importants au Brésil, où *S. frugiperda* est le principal nuisible et aussi dans une moindre mesure au Mexique et en Argentine où il est une peste plus sporadique. Les vers se trouvent aussi en Afrique (*S. exempta*); une autre espèce répandue est le légionnaire de la betterave (*S. exigua*) que l'on trouve en Asie et en Amérique du Nord.

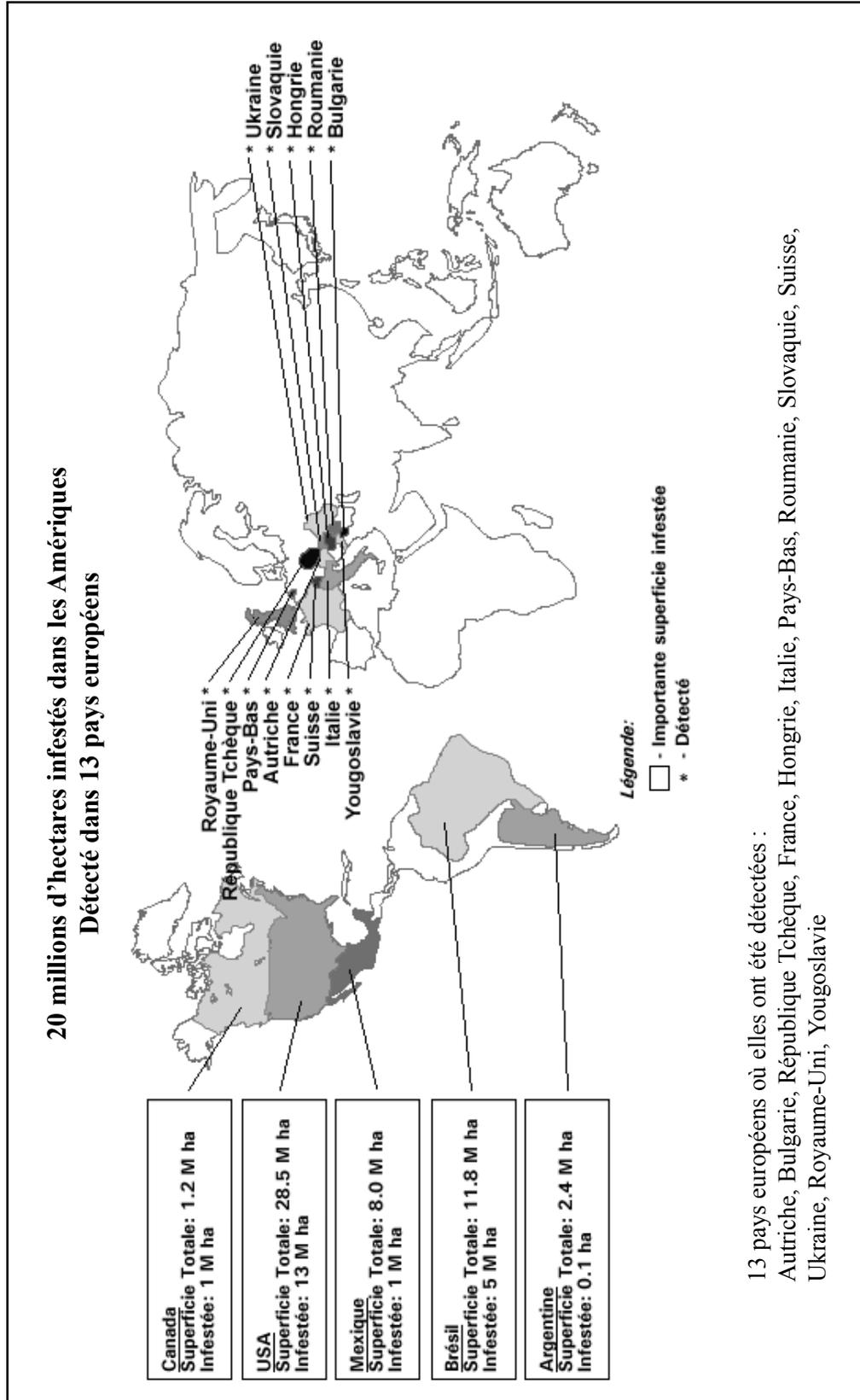
Les chenilles de «ver-gris»

Les chenilles de «ver-gris», contre lesquelles le gène Bt *cry1Ab* n'offre pas de protection, sont omniprésentes mondialement. L'espèce la plus importante est *Agrotis ipsilon*. La chenille détruit ou « coupe » les plantules. Actuellement, les dommages peuvent être minimisés via des contrôles de cultures et des applications d'insecticides. Le gène *cry1Fa2* qui a été récemment autorisé mais qui n'est pas encore largement déployé actuellement, devrait fournir un contrôle meilleur et efficace contre les noctuelles ypsilon.

Nuisibles d'après récolte

Les pertes d'après récolte peuvent être particulièrement importantes dans les pays en voie de développement où les conditions de stockage ne sont pas adéquates et où le climat est humide. Les principaux insectes nuisibles d'après récolte touchant le maïs sont les charançons des céréales (*Sitophilus* spp.), le grand capucin du maïs (*Prostephanus truncatus*), la pyrale indienne de la farine (*Plodia interpunctella*) et l'alucite des céréales (*Sitotroga cerealella*) qui peuvent causer des dommages importants. Les infestations avec les nuisibles d'après récolte se produisent dans le champ et elles sont transportées vers les lieux de stockage où elles causent des dommages très importants. Bien que les pertes dues aux insectes

Figure 4. Distribution mondiale des chrysomèles du maïs



Source: Rassemblé par Clive James, 2003.

nuisibles d’après récolte soient contrôlées de manière adéquate dans des conditions commerciales de stockage, les fermiers à faibles revenus des pays en voie de développement subissent souvent de très fortes pertes car les conditions de stockage ne sont pas adéquates et une forte humidité dans le grain aggrave les pertes. Le maïs Bt *cry1Ab* fournit quelques protections contre les dommages causés par les insectes nuisibles d’après récolte (Sedlacek et al. 2001). La stratégie pour réduire les pertes d’après récolte **inclut** l’amélioration pour une meilleure balle, un séchage des grains pour réduire les fortes pertes associées à la forte humidité du grain et le stockage dans des containers scellés pour diminuer les niveaux d’oxygène, qui diminue le développement des insectes et facilite la fumigation par des produits tels que le pirimiphos-méthyle.

8.1 Principaux nuisibles dans les trois pays cultivant le plus de maïs : USA, Chine et Brésil

La distribution et la sévérité des infestations par les insectes nuisibles dans les trois plus grands producteurs mondiaux - USA, Chine et Brésil – sont détaillées dans les tables 15, 16 et 17. Les niveaux d’infestation pour les différents méga-environnements dans chacun des pays sont répartis en quatre catégories : Trace, Faible, Moyen et Elevé.

USA

Il existe deux principaux nuisibles chez le maïs aux USA, chacun infestant jusqu’à 40 % des 32 millions d’hectares de maïs aux USA (table 15). L’infestation variera selon les années, la région et la variété. Bien que seulement 2 % du maïs américain soit pulvérisé pour lutter contre la pyrale, environ 8,5 millions d’hectares de maïs Bt *cry1Ab* ont été utilisés en 2002 pour contrôler la pyrale et la pyrale d’Europe. Cette dernière infesterait seulement 10% de la plante cultivée mais les dommages peuvent être importants. Le maïs Bt donne un meilleur contrôle que les pulvérisations d’insecticides, moins efficaces, moins pratiques et qui demandent beaucoup de temps. Les fermiers, très satisfaits, ont augmenté son adoption.

Table 15. Distribution et sévérité des infestations des principaux insectes nuisibles aux USA

Principaux nuisibles	Niveau d’infestation dans le méga-environnement tempéré
Pyrale	Moyen
Chrysomèle du maïs	Moyen
Pyrale d’Europe	Faible

Source: Dowswell, et al. 1996, modifié.

Les catégories d’infestation sont déterminées en fonction du pourcentage de la superficie nationale de maïs qui est infestée : TRACE 1 à 10 %, (en moyenne 5 %) de la superficie nationale de maïs infestée; FAIBLE (F) 11 à 30 % (moyenne de 20%); MOYEN (M) 31 à 50% (moyenne de 40%); ELEVE (E) 51 à 70% (moyenne de 60%)

Le second nuisible, par ordre d’importance, est la chrysomèle du maïs qui infeste environ 13 millions d’hectares de maïs dont 6 sont traités avec des insecticides, principalement des applications dans le sol au printemps pour lutter contre les larves, plus quelques applications foliaires ciblées pour lutter contre les adultes plus tard dans la saison. Les insecticides utilisés pour lutter contre la chrysomèle du maïs représentent 60 à 80% de tous les insecticides appliqués sur le maïs aux USA.

Chine

Sur une superficie de 25 millions d’hectares de maïs cultivé en Chine, 75 % sont situés dans un méga-environnement tempéré, 20 % dans un méga-environnement sub-tropical/tropical et 5 % dans un méga-environnement tempéré/sub-tropical. Le principal insecte nuisible en Chine est la pyrale asiatique. Elle est présente à des taux d’infestation moyens dans les zones tempérées et tempérées/sub-tropicales, et à de faibles niveaux d’infestation dans les méga-environnements sub-tropicaux/tropicaux (table 16). La noctuelle (*Helicoverpa armigera*) est présente à des niveaux d’infestation plus faibles que la pyrale asiatique. Dans les zones tempérées et tempérées/sub-tropicales, la noctuelle est présente à

Table 16. Distribution et niveaux d’infestation des principaux insectes nuisibles en Chine dans différents méga-environnements

Principaux nuisibles	Zone tempérée 75% de la superficie	Zone tempérée/Sub-tropicale 5% de la superficie	Zone sub-tropicale/tropicale 20% de la superficie
Pyrale asiatique (<i>Ostrinia furnacalis</i>)	Moyen	Moyen	Faible
Noctuelle (<i>Helicoverpa armigera</i>)	Faible	Faible	Trace

Source: Dowsell, et al. 1996, modifie.

Les catégories d’infestation sont déterminées en fonction du pourcentage de la superficie nationale de maïs qui est infectée : TRACE 1 à 10 %, (en moyenne 5 %) de la superficie nationale de maïs infestée; FAIBLE (F) 11 à 30 % (moyenne de 20%); MOYEN (M) 31 à 50% (moyenne de 40%); ELEVE (E) 51 à 70% (moyenne de 60%)

des taux d’infestation faibles et seulement à l’état de traces dans les méga-environnements sub-tropicaux/ tropicaux.

Brésil

Au Brésil, 70 % du maïs est cultivé dans le méga-environnement de plaines tropicales alors que les 30% restant le sont dans le méga-environnement sub-tropical. Les deux principaux nuisibles, le légionnaire d’automne et la pyralide, montrent des niveaux d’infestation élevés dans les plaines tropicales et moyens dans les zones sub-tropicales.

La pyrale de la canne à sucre est responsable de faibles infestations dans les régions de plaines tropicales et les régions sub-tropicales (table 17). Les chrysomèles du maïs affecteraient 5 millions d’hectares de maïs au Brésil. Elles sont présentes à des niveaux d’infestation moyens dans les plaines tropicales et les régions sub-tropicales. Les chenilles de «ver-gris» auraient des niveaux d’infestation faibles dans les plaines tropicales et moyens dans la zone sub-tropicale. Les scarabées blancs sont aussi importants au Brésil. Soixante-dix pour cent du maïs brésilien sont cultivés dans les plaines tropicales où les pertes d’après récolte dues aux insectes nuisibles sont habituellement élevées, entraînant de lourdes pertes si des mesures adéquates de protection ne sont pas mises en œuvre.

Les infestations des charançons des céréales sont importantes tant dans les plaines tropicales que dans les zones sub-tropicales bien que la mite des grains cause des pertes moyennes dans les plaines tropicales et fortes dans les zones sub-tropicales. Les pertes d’après récolte dues aux insectes nuisibles, qui peuvent atteindre 40 %, sont particulièrement importantes au niveau du petit fermier où des conditions inadéquates et un niveau d’humidité élevé des grains aggravent le problème.

8.2. Distribution des nuisibles du maïs

Les informations de la table 18 indiquent la distribution des principaux insectes nuisibles du maïs dans le Top 25 des pays. Il est évident que les chenilles foreuses sont actuellement présentes en tant que nuisible principal dans les 25 pays alors que le légionnaire uniponctué n’est un nuisible important que dans 9 pays des Amériques et les Philippines et que la noctuelle n’est présente que dans 6 pays. La noctuelle du maïs peut être un nuisible important dans 6 pays et les chrysomèles du maïs dans quatre pays des Amériques. Les chrysomèles ont été découvertes récemment dans cinq pays en Europe – Roumanie, France, Yougoslavie, Italie et Hongrie – qui figurent dans le Top 25 des producteurs de maïs du monde. Les informations présentées dans la table 19 donnent une estimation des superficies infestées

Table 17. Distribution et gravité des infestations par les principaux insectes nuisibles au Brésil dans différents méga-environnements

Nuisible Principal	Plaine tropicale 70% de la superficie	Zone sub-tropicale 30% de la superficie
Légionnaire d'automne	Elevé	Moyen
Pyralide	Elevé	Moyen
Pyrale de la canne à sucre	Moyen	Faible
Chrysomèles du maïs	Moyen	Moyen
Chenille de «ver-gris»	Faible	Moyen

Source: Dowswell, et al. 1996, modifie.

Les catégories d'infestation sont déterminées en fonction du pourcentage de la superficie nationale de maïs qui est infectée : TRACE 1 à 10 %, (en moyenne 5 %) de la superficie nationale de maïs infestée; FAIBLE (F) 11 à 30 % (moyenne de 20%); MOYEN (M) 31 à 50% (moyenne de 40%); ELEVE (E) 51 à 70% (moyenne de 60%)

par les principaux Lépidoptères nuisibles et les chrysomèles dans les pays du Top 25 des producteurs de maïs. Les quatre catégories d'infestation sont créées en fonction du pourcentage moyen des superficies de maïs infectées : *Trace* couvre 1 à 10 % (avec une moyenne 5 %) de la superficie nationale de maïs infestée; *Faible* touche de 11 à 30 % (avec une moyenne de 20 %); *Moyen* de 31 à 50 % (avec une moyenne de 40 %); *Elevé* de 51 à 70 % (avec une moyenne de 60 %) et une infestation de plus de 70 % est considérée comme *Très élevée*.

Une tendance générale distincte montre que les méga-environnements tempérés sont généralement placés dans la catégorie M avec 40 %, en moyenne, des superficies nationales de maïs infestées alors que les zones tropicales et sub-tropicales cultivées avec du maïs sont dans la catégorie E avec, en moyenne, 60 % de la superficie nationale de maïs qui est infestée. Ces données doivent être interprétées avec précaution car elles sont sujettes à des fluctuations selon les années, les régions et les conditions de culture. Beaucoup de pays comme la Chine, ont des méga-environnements tempérés et sub-tropicaux qui contribuent à la variabilité dans les niveaux d'infestation. En moyenne, environ 45 % des 116 millions d'hectares de maïs cultivés dans les pays du Top 25 seraient infestés par des Lépidoptères nuisibles, principalement les chenilles foreuses ainsi

que le légionnaire d'automne, la noctuelle et les chrysomèles. Il ne s'en suit pas nécessairement que toutes les superficies infestées se prêtent à un contrôle économique car cela dépend de l'intensité de l'infestation. Par exemple, 13 millions des 32 millions d'hectares de maïs aux USA sont infestés avec les chrysomèles mais les fermiers considèrent, à juste titre ou non, que seul 6 millions d'hectares ont des niveaux d'infestation qui méritent un traitement avec des insecticides.

L'information saillante sur les insectes nuisibles du maïs au niveau mondial est résumé dans la figure 5 pour le Top 25 des pays producteurs de maïs dans le monde. Les données présentées sur la carte mondiale comprennent le classement du pays concernant la production de maïs (en millions de tonnes), la superficie nationale de maïs récoltée (en millions d'hectares), la proportion de la superficie nationale de maïs infestée (3 catégories Faible 20 %, Moyen 40 % et Elevé 60 %) et une énumération des principaux nuisibles. Il est évident qu'il y a un lien, entre la distribution et l'importance relative des nuisibles, et la géographie et surtout aux quatre méga-environnements du maïs (tropical, sub-tropical, montagne tropicale, tempéré). Ce sont les facteurs climatiques et apparentés associés avec les méga-environnements respectifs qui sont probablement les plus déterminants pour gouverner l'étendue de l'infestation et finalement les pertes

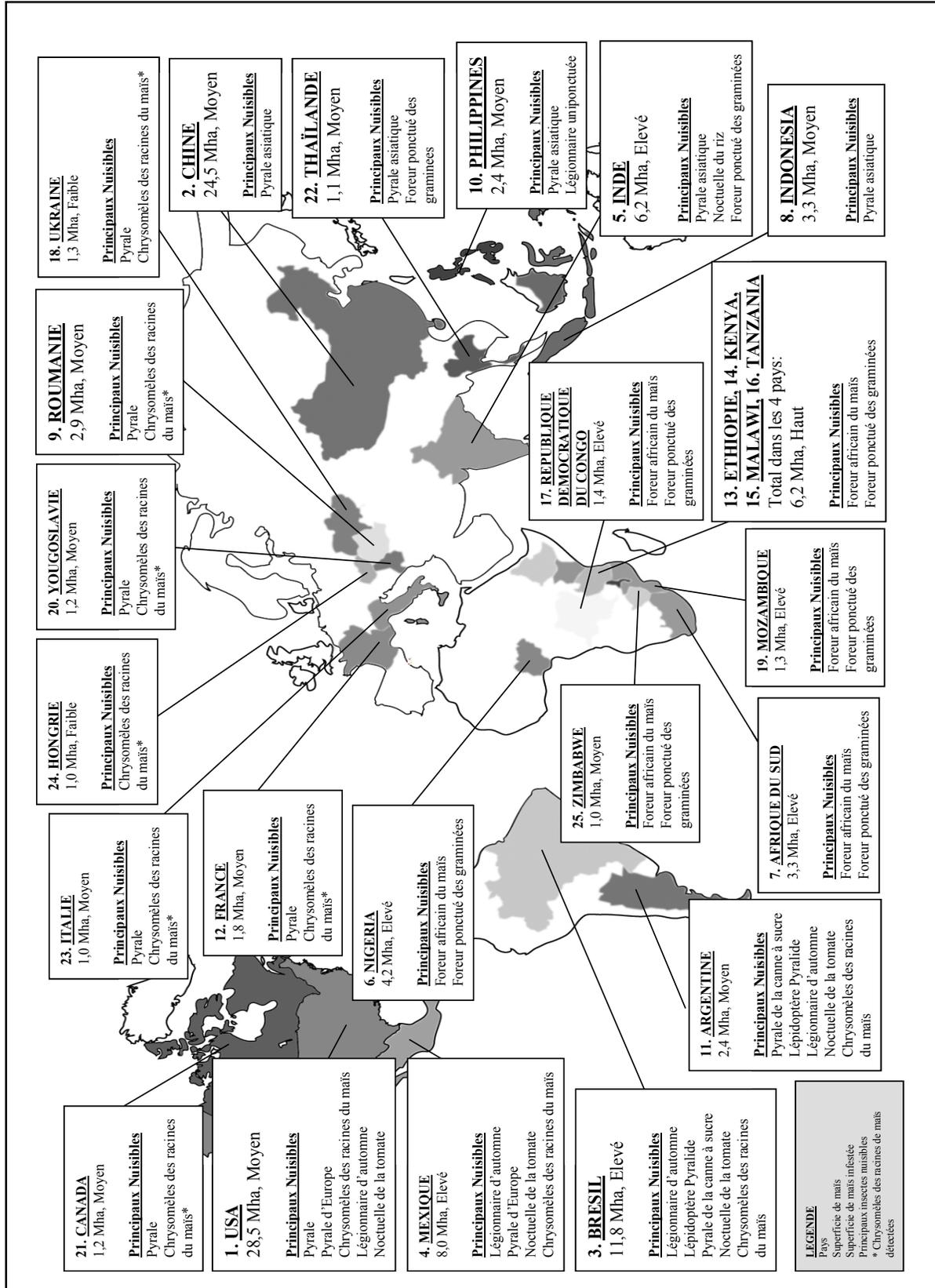
Table 18. Distribution des principaux nuisibles du maïs – pyrales, noctuelles, vers (Lepidotères) et chrysomèles (Coléoptères) dans les pays du Top 25 qui cultivent au moins 1 million d’hectares de maïs

Pays	Hectares (millions)	Pyrales	Noctuelles	Vers	Chrysomèles
1. USA	28.5	X	X	X	X
2. Chine	24.5	X		X	
3. Brésil	11.8	X	X	X	X
4. Mexique	8.0	X	X	X	X
5. Inde	6.2	X			
6. Nigeria	4.2	X			
7. Afrique du Sud	3.3	X		X	
8. Indonésie	3.3	X			
9. Roumanie	2.9	X			*
10. Philippines	2.4	X	X		
11. Argentine	2.4	X	X	X	X
12. France	1.8	X			*
13. Ethiopie	1.7	X			
14. Kenya	1.5	X	X		
15. Malawi	1.5	X	X		
16. Tanzanie	1.5	X	X		
17. Congo	1.4	X			
18. Ukraine	1.3	X			
19. Mozambique	1.3	X			
20. Yougoslavie	1.2	X			*
21. Canada	1.2	X	X		
22. Thaïlande	1.1	X			
23. Italie	1.0	X			*
24. Hongrie	1.0	X			*
25. Zimbabwe	1.0	X			
Sous-total	116.0 (84% of global)	25	9	6	4

Source: Données sur les superficies de maïs basées sur FAOSTATS 2003; information sur la distribution des nuisibles rassemblée par Clive James.

* détecté

Figure 5. Top 25 des pays producteurs de maïs, avec les détails concernant les superficies de maïs (en millions d'hectares [Mha]), la proportion de la superficie de maïs infestée (Faible, Moyen, Elevé), et les principaux insectes nuisibles



Source: Rassemblé par Clive James, 2003.

Table 19. Estimation des niveaux moyens d'infestations des principaux insectes Lépidoptères et des chrysomèles des racines du maïs dans les pays du Top 25 des producteurs de maïs cultivant 1 million d'hectares de maïs ou plus

Pays	Hectares (millions)	Niveau d'infestation du pays	Superficie Infestée (Millions d'hectares)
1. USA	28,5	M	11,4**
2. Chine	24,5	M	9,8
3. Brésil	11,8	H	7,1**
4. Mexique	8,0	H	4,3**
5. Inde	6,2	H	3,7
6. Nigeria	4,2	H	2,7
7. Afrique du Sud	3,3	M	2,0
8. Indonésie	3,3	M	1,3
9. Roumanie	2,9	M	1,2*
10. Philippines	2,4	M	1,0
11. Argentine	2,4	M	1,0**
12. France	1,8	M	0,7*
13. Ethiopie	1,7	H	0,7
14. Kenya	1,5	H	1,0
15. Malawi	1,5	H	0,6
16. Tanzanie	1,5	H	0,9
17. Congo	1,4	H	0,8
18. Ukraine	1,3	L	0,2
19. Mozambique	1,3	H	0,8
20. Yougoslavie	1,2	M	0,5*
21. Canada	1,2	M	0,5**
22. Thaïlande	1,1	M	0,4
23. Italie	1,0	M	0,4*
24. Hongrie	1,0	L	0,2*
25. Zimbabwe	1,0	M	0,4
Sous-total	116,0 (84% du total mondial)		53,6 (46% des 116.0)

Source: Rassemblé par Clive James à partir de différentes sources, 2003. Les catégories d'infestation sont basées sur le pourcentage des superficies nationales de maïs infectées : TRACE 1 à 10 % (en moyenne 5 %) de la superficie nationale de maïs infestée; FAIBLE (F) 11 à 30 % (moyenne de 20%); MOYEN (M) 31 à 50 % (moyenne de 40 %); ELEVE (E) 51 à 70 % (moyenne de 60 %), TRES ELEVE (TE) à plus de 70 % de la superficie de maïs infestée

** Importante superficie infestée par la Chrysomèle, * Chrysomèle détectée.

économiques, qui seront considérées dans une section ultérieure.

En résumé, les principaux insectes nuisibles du maïs au niveau mondial d'un point de vue économique sont les différents foreurs de la famille des pyrales, suivis dans les Amériques par le complexe des chrysomèles, puis le légionnaire d'automne et les vers de l'épi qui sont des nuisibles importants dans quelques pays. Les produits de maïs Bt actuellement déployés (*cry1Ab*) offrent un contrôle pour la plupart des foreurs et les chrysomèles (*cry3Bb1*) ainsi qu'un contrôle de quelques autres nuisibles importants comme la noctuelle (*Helicoverpa armigera*) et le légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) pour lesquels le nouveau gène *cry1Fa2* offre un contrôle amélioré et efficace du légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) et de la noctuelle ypsilon.

9. Pertes de récolte, coûts de contrôle et gains économiques apportés par le maïs Bt

9.1 Etude mondiale

Les insectes nuisibles du maïs sont connus pour causer des pertes économiques pour les plantes cultivées et sont une contrainte pour la productivité du maïs pour une importante proportion sur les 140 millions d'hectares de maïs cultivés dans le monde. En absence de toute forme de mesures de contrôle obtenue par des variétés résistantes, les insecticides, le contrôle cultural et les systèmes de gestion intégrée des nuisibles (IPM), les pertes potentielles dues à tous les insectes nuisibles du maïs sur une base mondiale sont estimés de l'ordre de 14 à 18 % (table 20) (Oerke 2002). Pour mettre ceci dans le contexte, il convient de noter que cela correspond à environ la moitié des pertes correspondantes estimées pour les insectes nuisibles du coton (35-41 %) (Oerke 2002, James 2002b), qui est la perte la plus importante pour les insectes nuisibles sur toutes les plantes cultivées dans le monde entier.

En comparaison avec les pertes globales potentielles de 14 à 18 % pour tous les insectes nuisibles du maïs, les pertes actuelles, lorsque les contrôles sont utilisés, sont estimées entre 6 et 17 % (table 20), ce qui indique que l'augmentation de rendement dans les zones où le contrôle se fait par des applications d'insecticides ou d'autres formes de contrôle est de l'ordre de plus de 5%. Les pertes des plantes cultivées sont liées au niveau d'infestation, qui va varier selon les années, les pays et les variétés. Les données de la table 20 montrent la gamme des pertes de rendement des plantes cultivées actuelles et potentielles pour différentes régions du monde. Les données sont des estimations globales et peuvent sous- ou sur-estimer les pertes actuelles dues aux nuisibles au niveau de la ferme mais elles sont utiles pour détecter les tendances, les grands traits et les différences d'ordre de grandeur. Par exemple, en ce qui concerne les pertes potentielles, il y a des caractéristiques qui indiquent que l'Afrique a les plus fortes pertes avec 17 %, suivie par l'Asie (16 %) et les Amériques (15 %) alors que le CEI, l'Europe et l'Océanie sont toutes à 14 %. Les pertes actuelles montre une tendance similaire avec les plus fortes pertes en Afrique (14 %), le CEI (13 %), suivie par l'Asie (12 %), les Amériques (11 %) ; l'Europe et l'Océanie ont les plus faibles pertes (9 %).

Ces tendances fournissent des indications utiles en ce sens qu'elles reflètent les pertes potentielles et actuelles les plus fortes dans les environnements tropicaux et sub-tropicaux, par comparaison aux environnements tempérés avec les plus fortes pertes qui sont enregistrées en Afrique, suivi par l'Asie et l'Amérique Latine. En comparant les pertes potentielles et actuelles, il est aussi évident que le degré de contrôle est plus faible (1 à 4 %) en Afrique, Asie, Amérique Latine et CEI qu'en Amérique du Nord (8 %), Europe (5 %) et en Océanie (5 %). Ces tendances sont en accord avec l'utilisation plus importante de variétés résistantes, une application plus intensive d'insecticides dans les pays industriels que dans les pays en voie de développement. Par exemple, presque la moitié (40 %) des insecticides utilisés mondialement sur le maïs est utilisée aux USA (table 33) qui a seulement

Table 20. Eventail des pertes actuelles et potentielles dues aux insectes nuisibles du maïs pour différentes régions du monde

	Plaine tropicale 70% de la superficie	Zone sub-tropicale 30% de la superficie
AFRIQUE	14	17
Est	17	18
Ouest	17	17
Sud	13	16
Nord	9	17
ASIE	12	16
Sud-est	15	18
Sud	15	16
Est	9	16
Moyen-orient	10	14
AMERIQUES	11	15
Cône méridional d'Amérique du Sud	13	15
Andes	10	14
Amérique du nord	6	14
Centrale	13	15
CEI	13	14
EUROPE	9	14
OCEANIE	9	14

Source: Oerke 2002 dans CABI Crop Protection Compendium, 2002.

20 % de la superficie mondiale de maïs. Environ 60 à 80 % des insecticides utilisés sur le maïs aux USA sont destinés à lutter contre les chrysomèles. Les données de la table 20 montre que les mesures de contrôle les plus importantes (8 %) contre les nuisibles du maïs sont réalisées en Amérique du Nord (14 % de pertes potentielles contre 6 % de pertes actuelles), avec un bon niveau de contrôle en Europe, Océanie, Asie de l'est (Chine) et en dans le nord de l'Afrique. En se basant sur les données de production et les pertes dues aux insectes du maïs de Oerke 2002 (table 20), le tonnage des pertes dues aux insectes du maïs peut être calculé sur une base

globale pour chaque continent et pour les sous-régions des continents. Ainsi, les pertes globales actuelles dues aux insectes nuisibles sont estimées à 52.6 millions de tonnes (table 21) ce qui équivaut à environ 9 % de la production globale de 600 millions de tonnes.

En se basant sur les prix internationaux du maïs à la mi-2003 (World Bank 2003) de 108 \$/tonne (No.2 Yellow FOB US Gulf Ports), les pertes mondiales actuelles dues aux insectes nuisibles du maïs sont évaluées à 5,7 milliards de dollars. L'ordre de grandeur des pertes pour chaque continent et sous-

région dépendra de deux facteurs, la production de maïs et le % de pertes. Ainsi, en termes de pertes absolues, les plus grandes pertes se produisent dans les Amériques avec un total de production de 250 millions de tonnes (40 % de la production mondiale) et les pertes vont de 6 % en Amérique du Nord jusqu'à 13 % en Amérique centrale et dans le cône méridional d'Amérique du Sud, ce qui résulte en une perte due aux insectes nuisibles du maïs de 23,7 millions de tonnes pour les Amériques. Le chiffre de 23,7 pour les Amériques est à comparer avec les 16 millions de tonnes pour l'Asie, 6,3 millions de tonnes pour l'Afrique, 5,9 millions de tonnes pour l'Europe, 0,7 millions de tonnes pour les pays de la CEI et moins de 0,1 millions de tonnes pour l'Océanie. La production mondiale de maïs d'environ 600 millions de tonnes, évaluées en prenant les prix internationaux de 108 \$/tonne à la mi-2003, vaut environ 65 milliards de dollars. Par conséquent, la valeur des pertes de maïs dues aux insectes nuisibles pour les Amériques s'élève 2,6 milliards de \$, 1,6 milliards de \$ pour l'Asie, 0,8 milliards de \$ pour l'Afrique, 0,6 milliards de \$ pour l'Europe, 0,1 milliards de \$ pour la CEI et moins de 0,1 milliards de \$ pour l'Océanie, soit un total de 5,7 milliards de \$.

9.2 Estimation des pertes et des gains économiques de récolte dus aux chenilles foreuses contrôlées par *Cry1Ab* par région et par pays

Il existe une pléthore de références sur les pertes des cultures dues aux insectes nuisibles du maïs, mais des méthodologies différentes ont été utilisées, ce qui rend les interprétations très ardues. La plus grande partie des références a été générée aux USA, qui est le plus grand producteur de maïs dans le monde, consommant environ la moitié des insecticides appliqués sur le maïs dans le monde et comptant pour 85 % de la superficie mondiale de 10 hectares plantés avec du maïs Bt en 2002. Cette section se concentre sur:

- Les pertes de récolte et les coûts de contrôle associés aux insectes nuisibles qui peuvent

être limités avec le gène Bt *cry1Ab* qui contrôle les principaux nuisibles comprenant principalement la famille des chenilles foreuses qui attaque le maïs dans le monde entier.

- Une évaluation préliminaire des pertes de rendement associées avec le complexe des chrysomèles pour lequel le gène *cry3Bb1* a été autorisé et déployé pour la première fois aux USA en 2003.

USA

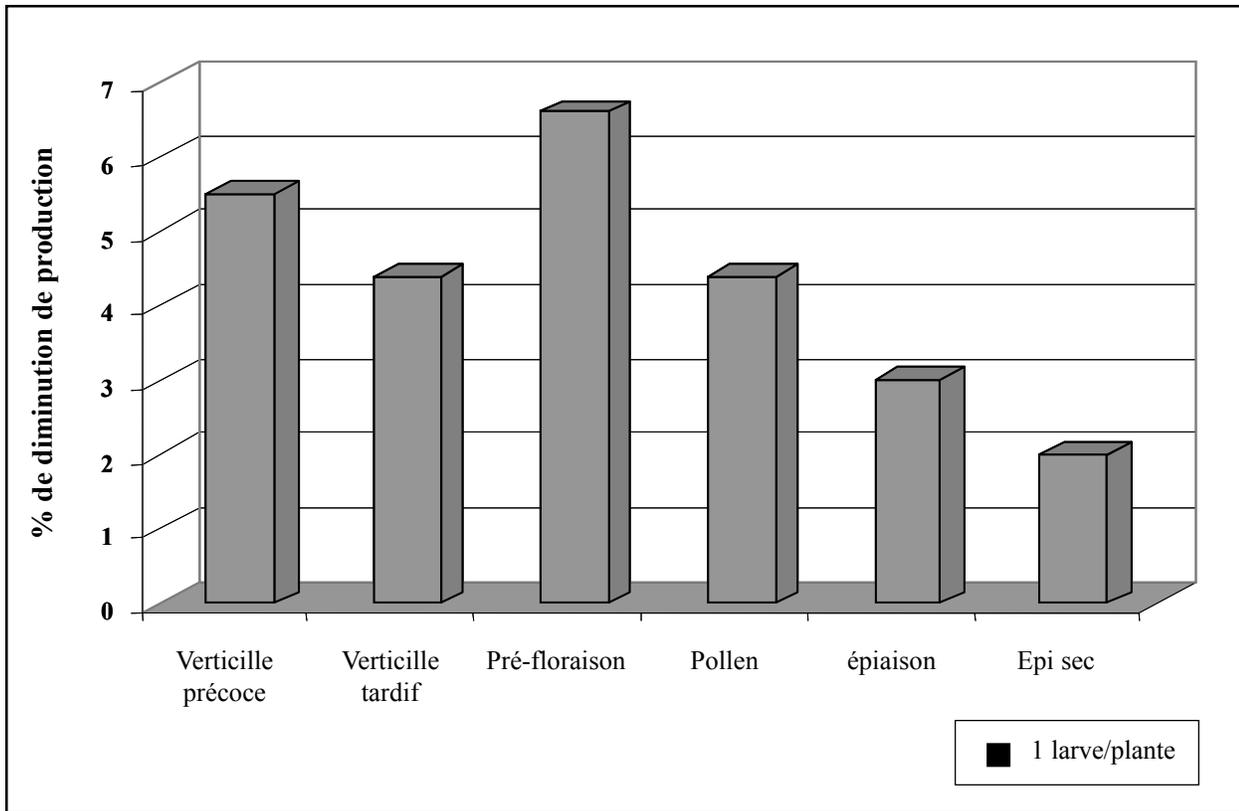
La recherche de Bode et al. (1990), a montré que les pertes de rendement dues à la pyrale étaient en relation avec le stade de croissance de la plante. Ainsi, la combinaison une larve-une plante au premier stade de verticille conduit à une perte de 5,5 %, au stade verticille tardif la perte est de 4,4 %, de 6,6% au stade pré-floraison, de 4,4 % au stade du pollen, de 3 % à l'épiaison et de 2% au stade épi sec (figure 6). Il est important de noter que les estimations de pertes de la figure 6 sont cumulatives. Ainsi, l'infestation d'une larve par plante au stade verticille précoce entraînerait une perte de 5,5 % qui réduit le rendement potentiel de 100 à 94,5 unités. Une infestation supplémentaire de une larve par plante au stade pollen entraînerait une perte de 4,4 % sur le rendement potentiel réduit de 94,5 unités, réduisant davantage le rendement potentiel à 90,1 unités, ce qui équivaut à une perte de presque 10 % au stade du pollen. Des infestations successives au stades épiaison et épi sec, infligeraient davantage de pertes cumulatives car le rendement potentiel est érodé avec chaque nouvelle infestation, ce qui résulte avec des pertes globales significatives. Les pertes actuelles seraient influencées par les conditions de culture dominantes, les autres stress biotiques et abiotiques y compris les dommages par les autres nuisibles. L'USDA a publié des rapports annuels sur les pertes dues à la pyrale pour la période de 1942 à 1974 (USDA 1975). Les pertes annuelles ont varié de 83'000 millions de tonnes en 1952 à 7,6 millions de tonnes en 1971, ce qui équivaut à une perte de 5,3 % sur la production nationale de maïs aux USA de 143 millions de

Table 21. Estimations mondiales et régionales des pertes de culture dues aux insectes nuisibles du maïs

	Production Millions de tonnes	Production Valeur en milliards de \$	% Pertes	Pertes des cultures en millions de tonnes	Valeur des pertes de culture dues à des insectes du maïs en milliards de \$
Amériques					
Amérique du nord	250,9	27,1	6	15,1	1,6
Région des Andes	52,1	5,6	10	5,2	0,6
Amérique centrale	21,5	2,3	13	2,8	0,3
Cône méridional d'Amérique du sud	4,7	0,5	13	0,6	0,1
Sous-total Amériques	329,2	35,5		23,7	2,6
Asie					
Asie Est	115,7	12,5	9	10,4	1,1
Asie Sud-Est	21,2	2,3	15	3,2	0,3
Asie Sud	14,3	1,5	15	2,1	0,2
Proche-Orient	3,5	0,4	10	0,3	<0,1
Sous-total Asie	154,7	16,7		16,0	1,6
Afrique					
Est	13,6	1,5	17	2,3	0,3
Ouest	11,9	1,3	17	2,0	0,2
Sud	10,6	1,1	13	1,4	0,2
Nord	6,5	0,7	9	0,6	0,1
Sous-total Afrique	42,6	4,6		6,3	0,8
Europe	65,2	7,0	9	5,9	0,6
CEI	5,6	0,6	13	0,7	0,1
Océanie	0,6	<0,1	9	<0,1	<0,1
TOTAL MONDIAL	597,9	64,5		52,6	5,7

Source: Rassemblé par Clive James, 2003, Basé sur le prix international actuel (mi 2003) de 108 \$/tonne (World Bank, 2003), et estimations des pertes dues aux insectes de Oerke, 2002, in CABI Crop Protection Compendium 2002.

Figure 6. Diminution de la production due à la Pyrale



Source: Bode et al 1990, Purdue University

tonnes en 1971. En plus des pertes dans le tonnage de grain dues aux insectes du maïs, le coût des insecticides et des autres approches IPM, par exemple, l'utilisation de la guêpe *Trichogramma* pour le contrôle biologique, représente un coût qui doit être **inclus** dans l'estimation globale des coûts associés avec les insectes nuisibles du maïs.

Les nombreuses données américaines sur les pertes de culture imputables à la pyrale ont été récemment examinées (Marra et al.2002). Les indications globales de cinq études nationales, qui ont été réalisées, montrent une augmentation de la production associée avec le maïs Bt, (ou les pertes de production dues aux insectes nuisibles contrôlés par le gène Bt *cry1Ab*), aux USA durant la période de quatre ans (1997 – 2000) de l'ordre de 5 % (table

39). Il est reconnu que les pourcentages de pertes dus aux insectes nuisibles contrôlés par le Bt varieront significativement selon les années et les régions. En conséquence, il n'est pas surprenant que les résultats de Marra et al. (2002) résumés par Brookes (2002) montrent une variation considérable (table 22). Les plus fortes variations concernaient l'étude en Illinois où le bénéfice moyen était de 12 % avec une variation allant de 1,1 à 22,6 % alors que la plus petite variation était au Nebraska avec un bénéfice moyen de 5,5 % pour une variation de seulement 3,2 à 7,9 %. Le gain moyen de production dans le travail de Marra et al. (2002) a été converti de boisseau/acre en tonnes/hectare par Brookes (2002) qui reporte que le gain moyen de production pour les cinq études, tenant compte des études nationales, et réalisées pendant la période 1997 à

2000, était de 420 kg/hectare ce qui équivaut à un gain de 5,04 % avec une variation de 2,5 à 9 %. Pour les 23 autres études réalisées dans sept Etats différents sur une période de quatre ans, le gain moyen en production en faveur du maïs Bt était de 8 %.

Un ensemble correspondant de données américaines non publiées provenant de l'industrie est résumé dans la table 23 (Industry Source 2003a). Les données concernent la période de huit ans (1995-2002) et sont basées sur un total de 8'866 comparaisons (moyenne de 1'108 comparaisons par année) entre une variété de maïs Bt et son équivalent conventionnel. La production moyenne durant la période de huit ans était de 8,15 tonnes par hectare avec un avantage moyen de production de 423 kg/hectare, ce qui équivaut à un gain moyen de 5,2 % sur la période de huit ans. L'avantage de production du maïs Bt dans ces données est corrélée négativement avec l'index des larves de pyrale qui est modérément élevé en 1996 avec 1,4 pyrales/tige (cf. figure 7) quand le bénéfice était de 500kg/hectare – ceci comparé au bénéfice de 588 kg/hectare en 1997 alors que l'index était de 1,6 pyrales/tige et le bénéfice de seulement 200 kg/hectare en 1998 (le plus faible bénéfice enregistré) qui était associé avec le niveau historiquement bas de seulement 0,3 pyrales/tige en 1998. Il convient de noter que les trois années, 1998, 1999 et 2000, étaient les années durant lesquelles l'index de la pyrale était à des niveaux historiquement bas de 0,3, 0,3 et 0,4 respectivement et coïncidaient exactement avec les seules trois années durant lesquelles le gain de production en faveur du maïs Bt était inférieur à 5 % (table 23). Pour les cinq autres années durant la période de huit ans (1995-2002), le gain de production en faveur du maïs Bt variait de faible (6,1 %) à fort (9,1 %).

En comparant l'ensemble des données du secteur public (Marra et al.2002) et les données provenant du secteur privé dans la table 40, le bénéfice moyen pour les USA déduit des données du secteur public est de 420 kg/hectare ce qui équivaut à un gain moyen sur la période de 1997-2000 de 5 %, comparé au chiffre de 423 kg/hectare provenant de l'étude du

secteur privé qui est équivalent à un gain moyen de 5,2 % sur les huit années de la période 1995-2002. Les deux études indiquent que le gain moyen dû au maïs Bt, ou formulé autrement, la perte due aux insectes nuisibles contrôlés par Bt, était cohérente à environ 5 % sur une période de quatre à huit ans pour les USA nationalement.

La figure 7 montre les densités de pyrale enregistrées annuellement par l'université de l'Illinois de 1943 à 2002. Le plus haut niveau a été enregistré en 1949 avec environ 4,1 larves de pyrale/tige. Lors de la première plantation de maïs Bt aux USA, en 1996, alors que seuls environ 0,3 millions d'hectares étaient déployés, l'index de la pyrale était relativement haut à 1,4 pyrales/tige ; cependant, étant donné que la superficie de maïs Bt en 1996 était faible avec 0,3 millions d'hectares, les bénéfices des fermiers ont été estimés à seulement 12 millions de \$ (James 2001a) – cf. table 24. Durant la deuxième année de déploiement, 1997, l'index de la pyrale a augmenté légèrement à 1,6 (au lieu de 1,4 en 1996), mais les superficies de maïs Bt ont décuplé pour atteindre presque 3 millions d'hectares et les gains étaient estimés à 89 millions de \$ (Carpenter and Gianessi, 2001). En 1998, bien que les superficies de maïs Bt aient continué à augmenter, l'index de la pyrale est tombé à un niveau historiquement bas de 0,3 pyrales/tige et a continué à ce niveau en 1999. A cause des faibles infestations par la pyrale, Carpenter and Gianessi (2001) ont estimé que les fermiers ayant planté du maïs Bt ont réalisé une perte de 26 millions de \$ et de 35 millions de \$ respectivement en 1998 et 1999 (table 24). Aucune estimation de bénéfice/perte n'est disponible pour les USA en 2000 mais les fermiers américains n'ont pratiquement pas augmenté les superficies plantées avec du maïs Bt, probablement parce qu'ils ont conclu que les faibles niveaux de pyrale de 1999 ne méritaient pas du maïs Bt en 2000, car cette infestation continuerait à être faible. Les fermiers ont eu raison car l'index de la pyrale a continué à être faible en 2000 (0,4) et seuls les fermiers avec des infestations historiques importantes ont planté du maïs Bt. Cependant, en 2001, les fermiers ont diminué leurs plantations de Bt de 500'000 hectares mais l'index de la pyrale a

Table 22. Résumé de l'impact au niveau de la ferme sur le rendement du maïs Bt aux USA de 1997 à 2000

	Nombre d'études examinées	Bénéfice moyen de production par Etat du maïs Bt en tonnes/hectare	% du gain moyen	Variation
Corn Belt	6	+0,68	+8,12	+4 à +12,8
Illinois	4	+1,02	+12,26	+1,1 à +22,6
Iowa	5	+0,45	+5,34	+2,2 à +9,2
Kansas	3	+0,49	+5,87	+2,8 à +9,0
Minnesota	1	+0,14	+13,69	+13,69 à +13,69
Nebraska	2	+0,46	+5,57	+3,2 à 7,9
Dakota du sud	2	+0,65	+7,75	+5,8 à +9,7
National USA	5	+0,42	+5,04	+2,5 à +9,0

Source: Brookes (2002) à partir de Marra et al. (2002).

Table 23. Avantage de production du maïs Bt aux USA, 1995-2002

	Rendement (kg/hectare)	Gain annuel du maïs Bt (kg/hectare)	% de gain de rendement du maïs Bt	Nombre de comparaisons
1995	7,12	651	9,1%	495
1996	7,97	500	6,3%	2625
1997	7,95	588	7,4%	1048
1998	8,43	200	2,4%	1081
1999	8,39	213	2,5%	884
2000	8,59	288	2,9%	989
2001	8,67	451	5,2%	913
2002	8,15	500	6,1%	831
Moyenne	8,15	423	5,2%	1108

Source: Brookes (2002) à partir de Marra et al. (2002).

plus que doublé (passant de 0,4 à 0,9) (figure 13). Les bénéfices des fermiers en 2001 ont été estimés à 125 millions de \$ (Gianessi et al.2002). Une estimation annuelle des bénéfices n'a pas été faite en 2002, mais les fermiers ont augmenté leurs superficies de maïs Bt de plus de 1 million d'hectares aux USA en 2002 et ceci a coïncidé avec un autre fort index de pyrale (1,0 pyrales/tige). Les bénéficiers sont supposé être du même ordre, 125

millions de \$ comme en 2001. La gamme des études aux USA sur les pertes de récolte dues aux insectes nuisibles du maïs contrôlés par Bt, principalement la pyrale et la pyrale d'Europe ou inversement, les bénéfices de production associés au maïs Bt en comparaison avec le maïs conventionnel a quelques fois entraîné des conclusions tout à fait différentes. Par exemple, une étude réalisée par Benbrook et al., bien illustrée par une étude récente (Benbrook 2001)

conclu que le maïs Bt n'offre pas, aux fermiers, d'avantages systématiques et intéressants. D'un autre côté, plusieurs études de Gianessi et al. (2002) concluent que dans la majorité des cas, les fermiers plantant du maïs Bt vont gagner en terme de rendement et de gains sur les insecticides, ce qui à son tour va résulter en un gain général dans la plupart, mais pas dans tous les cas. La dernière information de Gianessi et al. (2003) conclu que lors d'une année typique (estimation faite en 2001), les fermiers qui ont planté du maïs Bt sur 6 millions d'hectares ont réalisé un gain de 266 kg/hectare, ce qui équivaut à une augmentation de rendement de 3,3 %, pour un gain d'environ 125 millions de \$ (table 24). Marra et al. (2002) rapportent un gain général de 5 % basé sur cinq études nationales sur une période de 4 ans (1997-2000) (table 39) et ils résument les aspects économiques du maïs Bt avec la déclaration suivante « le maïs Bt apporte un gain petit mais significatif la plupart des années dans la corn belt, et durant certaines années et dans certains lieux, cette augmentation sera substantielle » ce qui est cohérent avec un gain moyen de 5 % sur huit ans avec des gains atteignant 9 % quand les infestations de pyrale sont fortes.

Europe

L'Espagne est le seul pays de l'Union Européenne qui cultive une superficie significative de maïs Bt. En 2001, 25'000 hectares de maïs Bt étaient plantés, ce qui équivaut à 5 % des plantations nationales de maïs. Brookes (2002) a récemment réalisé une étude détaillée et a passé en revue la littérature sur les aspects économiques de l'utilisation du maïs Bt pour contrôler la pyrale en Espagne. Bien que les pertes imputables aux pyrales puissent s'élever jusqu'à 15 % dans certaines régions, il a conclu que les pertes moyennes de production estimées dans un tiers (36 %) de la zone nationale infestée par la pyrale étaient de 5 à 7 %. Il a calculé que le déploiement du Bt sur les 36% du territoire cultivé avec du maïs entraînerait un gain de production de 88 à 128'000 tonnes, soit une augmentation de 1,8 à 2,5 % de la production nationale, ce qui représente de 11 à 15 millions d'Euros. En plus des gains de productivité, les coûts des pulvérisations d'insecticides, qui sont

actuellement appliquées sur 6 à 20 % des 0,5 millions d'hectares de maïs en Espagne, pourraient être diminués pour 59 à 89'000 hectares conduisant à des économies supplémentaires.

L'expérience espagnole avec la culture de deux variétés de maïs Bt de 1998 à 2002 a été positive pour les producteurs qui réalisent un supplément de 150 Euros/hectare dû à une augmentation de la productivité, et une économie de 20 Euros/hectare sur les insecticides, soit un gain total de 170 Euros/hectare (Fundacion Antama, 2003). En se basant sur ce succès et en réponse à la forte demande des fermiers pour de nouvelles variétés de maïs Bt, le Ministère de l'Agriculture a autorisé cinq nouvelles variétés en 2003 lorsque la superficie de maïs Bt a augmenté de 25'000 hectares en 2002 à 50'000 hectares en 2003. Les variétés avaient été développées par plusieurs compagnies : Syngenta, Pioneer, Monsanto, Nickerson et Limagrain. Brookes (2002) estime qu'il serait économiquement judicieux d'étendre l'adoption du maïs Bt aux zones infestées à plus de 36 % par la pyrale. Gianessi et al. (2003) projettent que les taux d'adoption équivalents pour fournir un gain économique similaire seraient de 40 % des 1,9 millions d'hectares de maïs en France, 50 % des 1,1 millions d'hectares en Italie et de 25 % des 0,4 millions d'hectares en Allemagne.

Gianessi et al. (2003) a réalisé des études détaillées similaires à celles réalisées aux USA pour quatre pays en Europe (France, Italie, Espagne et Allemagne). Les résultats sont résumés dans la table 25. Les gains de production au niveau mondial associés avec le maïs Bt, adopté sur 1,5 millions d'hectares, soit 41% de la superficie européenne totale de maïs, sont estimés à 1,9 millions soit 250 millions de \$. Ceci équivaut à une augmentation de 5-7 % de la production totale nationale, et pas seulement pour des zones infestées. Outre cette augmentation de la production, on prévoit une diminution concomitante de 52'600 kg d'insecticide (i.a.). L'Espagne, qui utilise la plupart des insecticides appliqués pour le contrôle de la pyrale, participera à 85 % dans cette diminution. Gianessi et al. (2003) rapportent que 5 à 7 % de la production potentielle européenne de maïs sont perdus chaque

année à cause de chenilles foreuses, les estimations annuelles des pertes actuelles dépendent de l'intensité de l'infestation (Labatte et al.1997, Manchini and Lozzia 2002).

En Europe, Bohn et al. (1999) ont montré que pour chaque larve de pyrale infestant une plante, la production est diminuée de 6 %. Les dommages causés par les pyrales augmentent dans les zones méditerranéennes plus chaudes de France, d'Italie et d'Espagne où 2 à 3 générations de larves sont normales alors qu'il y en a seulement une dans les zones plus froides du nord de l'Europe. Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer les pertes de culture associées avec la pyrale et la sésamie en Espagne. Une des plus détaillée est celle réalisée par Alcade (1999) quand les performances du maïs Bt étaient comparées aux variétés conventionnelles, dans des essais en champs dans toutes les régions du pays, utilisant des terrains d'essais de 1000 m². Les données, résumées dans la table 43, montrent que les pertes de production moyennes en 1997 étaient de 6,3 %, variant d'un minimum de 2,8 % dans la région de Madrid à un maximum de 12,9 % dans la région de Gérone.

La recherche réalisée dans la vallée du Rhin de 1998 à 2002 (cf. table 44) et dans l'est de l'Allemagne de 2000 à 2002 (cf. table 45) par Degenhardt et al. 2003 indique que 300'000 hectares sont touchés par la pyrale et que le maïs Bt fourni le contrôle le plus efficace (96-98% d'efficacité contre 83-88 % pour les insecticides et seulement 29-55% avec *Trichogramma*).

En comparaison avec le maïs conventionnel, le maïs Bt a un rendement supérieur de 14 à 15 %, contre 7 à 10 % avec les insecticides et seulement 2 à 3 % avec *Trichogramma*. Finalement, en termes de gains économiques, en comparaison avec une variété conventionnelle, le maïs Bt génère un gain de 84 à 93 Euros/hectare, les cultures avec des traitements insecticides un gain de 18 à 35 Euros/hectare et celles avec des traitements par *Trichogramma*, qui sont subventionnées en Allemagne, une perte de 52 à 57 Euros/hectare. En résumé, le maïs Bt permet une augmentation de rendement d'environ 15 % et les

Table 24. Estimations nationales des gains (pertes) économiques nets des fermiers qui plantent du maïs transgéniques aux USA, 1996-2001

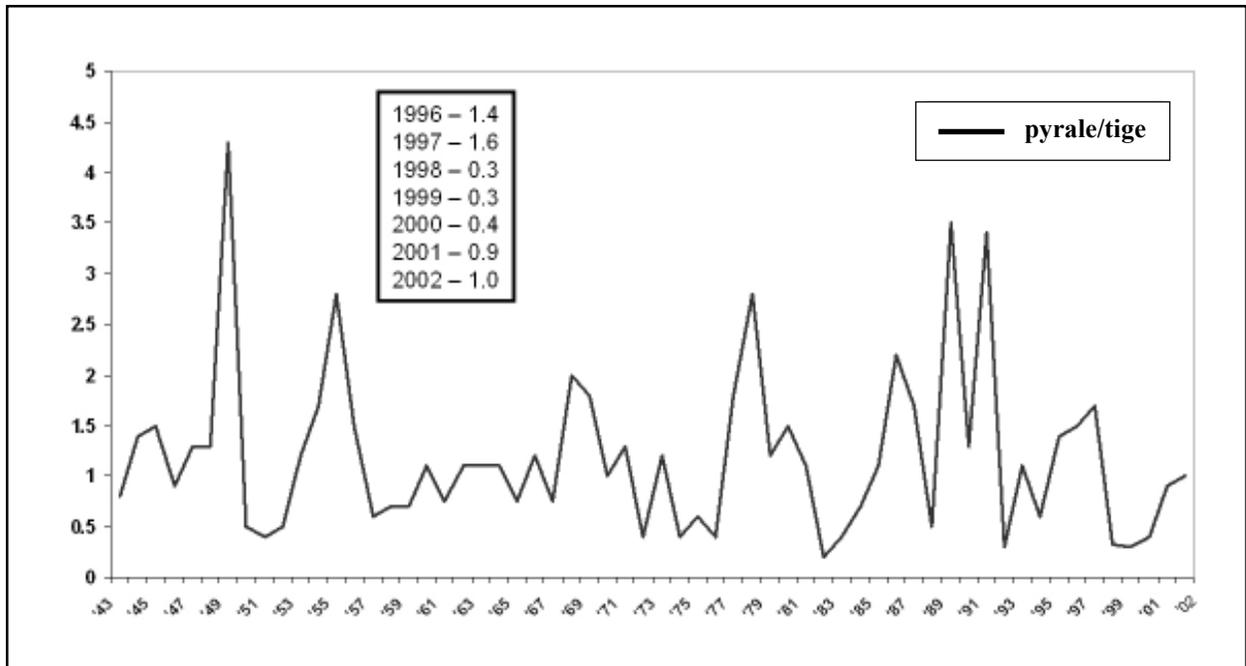
Pays/Année	Millions de \$
USA:	
1996	12 ¹
1997	89 ²
1998	(26) ²
1999	(35) ²
2001	125 ³

Source: Rassemblé par Clive James 2003 à partir des publications suivantes : ¹James 1998, ²Gianessi and Carpenter 2002, ³Gianessi et al. 2002

superficies infestées sont estimées à environ 300'000 hectares. Magg et al. (2000) ont aussi rapporté des gains sur les rendements du maïs Bt en Allemagne d'environ 12 % pour le maïs Bt en comparaison avec les variétés conventionnelles pour les saisons 1998 et 1999. En Union Européenne, la variété Bt176 a été autorisée pour la commercialisation en 1997 et la variété MON810 en 1998. L'Allemagne a cultivé une superficie symbolique jusqu'en 2000 et la dernière étude (Degenhardt et al.2003) indique qu'il pourrait être cultivé avec des bénéfices économiques sur jusqu'à 300'000 hectares.

En Italie, on estime que la pyrale infesterait presque toute la superficie de 1,1 millions d'hectares avec des pertes de rendements de 7 à 15 % (Gianessi et al.2003). Ces derniers rapportent que 5 à 7 % de la production potentielle de grain de maïs en Europe sont perdus annuellement à cause des pyrales. Le nord-ouest et la Scandinavie font exception car les pyrales ne sont pas une contrainte importante pour le maïs fourrager. En Italie, Onorato and Snidaro (1993) rapportent des niveaux de pertes dues aux foreurs du maïs sur une période de huit ans de l'ordre de 0 à 18 % avec une moyenne de 7,9 %. Dans les essais en champs en Espagne, les gains de rendement en faveur du maïs Bt rapportés sont de l'ordre de 11 % (Novillo et al.2003) et de 9 % (Garcia Olmedo 2003). D'autres recherches sur les

Figure 7. Densité de pyrale en Illinois, 1943-2002



Source: <http://www.ag.uiuc.edu/cespubs/pest/articles/200224b.html>

dommages et les pertes causées par la pyrale en Italie comprennent un rapport de Coppolino et al. (1985) qui indique que les faibles infestations conduisent à une perte de 0,45 tonnes/hectare, une infestation moyenne à une perte de 1,2 tonnes/hectare et une forte infestation entraîne une perte de 2,1 tonnes/hectare. Etant donné que les rendements en Italie sont de l'ordre de 10 tonnes par hectare, le pourcentage de perte serait de l'ordre d'environ 5 % pour une infestation faible, 10 % pour une infestation moyenne et de 20 % pour une forte infestation. Les données non publiées de l'industrie (Industry Source 2003b), basées sur les essais en champ réalisés en 1997, sont cohérentes avec les données ci-dessus, rapportant des augmentations de rendement d'environ 10 % en faveur du maïs Bt. En France, Anglade and Rautou (1970) rapportent des pertes allant jusqu'à 15 % pour la pyrale.

Amérique Latine

Pour l'Argentine, en se basant sur 1'500 données

extraites de rapports de l'industrie non publiés (Industry Source 2003c), on indique une augmentation de rendement de 10 % en faveur du maïs Bt qui contient le gène *cry1Ab* et neutralise la principale peste, la pyrale de la canne à sucre, ainsi que le légionnaire d'automne. Un autre rapport de l'industrie concernant les années 2000-2003 estime que les bénéfices de récolte sont de 8 % en faveur du maïs Bt pour l'Argentine (Industry Source 2003d).

Au Brésil, le troisième pays producteur de maïs dans le monde, les données d'essais en champ dans plusieurs Etats en 1999, 2000 et 2001 montrent une augmentation moyenne du rendement de 24 % en faveur du maïs Bt (Industry Source 2003e). L'augmentation de rendement correspondante dans les parcelles traitées avec des insecticides était de seulement 13 % soit environ la moitié du gain pour le maïs Bt. Le nuisible de loin le plus important dans les essais était le légionnaire d'automne. La pyralide, la pyrale de la canne à sucre et les vers gris étaient aussi présents mais à des niveaux beaucoup

Table 25. Etude détaillée des potentiels du maïs Bt en Europe

Pays	Superficie des cultures (ha)	%	Augmentation de la production (tonnes)	Valeur nette (millions de \$)	Utilisation d'insecticide (kg)
France	765'000	(40)	+857'000	101	-5,500
Italie	554'000	(50)	+607'000	107	-1,100
Espagne	181'000	(36)	+254'000	28	-45,200
Allemagne	99'000	(25)	+181'000	13	-800
Total	1'599'000	(41)	1'899'000	249	-52,600

Source: Gianessi et al. (2003)

plus faibles. Bien que la pyralide ait été et continue à être un nuisible important et que les infestations de la pyrale de la canne à sucre semblent être en augmentation ces dernières années. Le Brésil avec une grande superficie de 11,8 millions d'hectares de maïs, dont la plupart est située dans le méga-environnement tropical, où les infestations de nuisibles peuvent être importantes, serait susceptible de bénéficier significativement du déploiement du Bt et des autres nouveaux gènes pour contrôler les principaux ennemis du maïs. Ceci est cohérent avec le fait que le Brésil, qui dépense actuellement 100 millions de \$ par an pour les insecticides du maïs, est le second plus grand marché mondial pour les insecticides après les USA. L'utilisation des insecticides au Brésil est étudiée dans la section 8.10 qui traite du marché mondial des insecticides pour le maïs.

Pour le Honduras, les essais en champs en 2002 réalisés dans quatre différentes régions du pays montrent que l'augmentation de production en faveur du maïs Bt varie entre 6 et 21 % avec une moyenne de 12,7 % (Industry Source 2003f).

Asie

Les grands producteurs de maïs en Asie sont la Chine, l'Inde, l'Indonésie ainsi que les Philippines et la Thaïlande. Les estimations des pertes dues aux foreurs sont données pour chaque pays si elles sont disponibles.

Chine

La Chine, le second plus grand producteur de maïs dans le monde, produit environ 130 millions de tonnes de maïs sur 25 millions d'hectares. De loin, l'insecte nuisible le plus commun sur le maïs en Chine est la pyrale asiatique qui peut infester jusqu'à 70 à 80 % de la superficie de maïs. On estime qu'il cause des pertes de récolte annuelles de 7 à 20 % avec une perte de production moyenne de 10 % (Industry Source 2003g). La pratique actuelle en Chine est d'essayer de contrôler la pyrale asiatique avec du Parathion, avec le *Trichogramma*, avec une lampe à arc au mercure ou par des applications d'hormones, mais aucune de ces méthodes de contrôle n'est efficace. Les expériences en champs avec le maïs Bt indiquent que des gains de rendement de 17 % (Industry Source 2003h) en faveur du maïs sont possibles, avec des niveaux d'infestation moyens et pouvant atteindre 23 % lors d'infestations importantes (Industry Source 2003i). En 1997, le gain moyen de rendement des essais de maïs Bt dans sept provinces était de 19 %. D'autres estimations de pertes dues aux foreurs en Chine comprennent une estimation de 5-7 % faite par He et al. (2003) et de 5 –10 % faite par Wang (2003). Des essais en champ avec le maïs Bt montrent des gains de production en faveur du maïs Bt variant de 9 % (Wang 2003) à 17% et 23% - cf. table 30. Le dernier gain de 23 % est cohérent avec les gains de production les plus élevés de 25 à 40 % rapportés plus bas pour les Philippines (Gonzalez 2002) – cf. table 30 pour toutes les références pour l'Asie. Les

Table 26. Comparaisons des rendements des maïs Bt et conventionnels en Espagne en 1997 (tonnes/hectare)

Région	Rendement Moyen Bt	Rendement Moyen Variétés Conventionnelles	Millions de \$
Albacète	14,2	13,34	+6,4
Gérone	13,63	12,07	+12,9
Huesca	13,35	12,54	+6,5
Lleida	13,72	13,13	+4,5
Madrid	14,70	14,28	+2,9
Saragosse	12,01	11,32	+6,1
Toutes les régions ci-dessus	13,30	12,51	+6,3

Source: Alcade E (1999). Les résultats sont basés sur les surveillances des terrains d'essais de 1000 m² dans chaque région en 1997.

Table 27. Comparaison des performances des maïs Bt et conventionnels dans la vallée du Rhin en Allemagne, 1998 -2002

Traitement	Infestation	Efficacité du contrôle	Gain de rendement %	Gain économique Euros/hectare
Bt	0	98	114	+84
Conventionnel	0,2	0	100	0
<i>Trichogramma</i>	0,08	58	103	-52
Insecticide	0,04	88	107	+18

Source: Degenhardt et al. (2003)

Table 28. Comparaison des performances des maïs Bt et conventionnels dans la région de Oderbruch, est de l'Allemagne, 2000-2002

Traitement	Infestation	Efficacité du contrôle	Gain de rendement %	Gain économique Euros/hectare
Bt	0	96	115	+93
Conventionnel	0,8	0	100	0
<i>Trichogramma</i>	0,7	29	102	+55
Insecticide	0,2	83	110	+57

Source: Degenhardt et al. (2003)

valeurs des pertes en Chine sont estimées à une moyenne de 5 % ou 6 millions de tonnes estimées à 650 millions de \$ annuellement (table 55).

Philippines

En 2001, des essais en champ avec du maïs Bt ont été réalisés aux Philippines dans trois localisations différentes : Isabelita (3), Bukidnon (1) et Camarines Sur (1). La taille moyenne des fermes est petite et elle varie de 1,1 à 1,9 hectares. L'objectif de cette étude multi-localisation était de conduire une évaluation socio-économique des performances du maïs Bt en comparaison avec le maïs conventionnel. Quatre comparaisons différentes ont été faites pour les augmentations de production, les coûts de production, la rentabilité nette et la capacité limite du niveau de subsistance assurée par la production du maïs. Cette dernière est définie comme la capacité d'acheter un panier d'aliment de 2'000 calories par personne pour une famille de cinq personnes grâce au revenu net de la production du maïs. Pour les quatre comparaisons, le prix des semences de maïs Bt a été présumé identique à celui des semences conventionnelles, 2'000 pesos/sac, plus 800 pesos/hectare pour les insecticides soit un total de 2'800 pesos comparés aux 2'000 pesos/sac pour les semences conventionnelles. Les comparaisons des résultats des essais en champ de maïs Bt ont aussi été faites avec les meilleures pratiques agricoles en utilisant les rendements en champ d'un groupe de fermiers avec des rendements élevés et un autre avec des rendements bas.

Les résultats des essais des Philippines (Gonzalez 2002) montraient que les maïs Bt hybrides dépassaient régulièrement les rendements des maïs hybrides conventionnels de 41 % dans les essais et de 60 % comparés avec l'expérience du fermier. Les coûts de production du maïs Bt étaient inférieurs de 24 % par rapport au maïs conventionnel dans les essais en champ, supérieurs de 13 % si on compare avec les rendements de l'essai réalisé avec le groupe des fermiers qui obtient les rendements les plus élevés et supérieur de 39% dans le cas de la comparaison avec l'essai fait par le groupe des fermiers avec les rendements les plus faibles. Les résultats de la comparaison montrent que la capacité

limite du niveau de subsistance de la technologie montrait que bien que le maïs Bt pouvait répondre aux besoins de subsistance d'une famille de cinq alors que le maïs conventionnel ne le pouvait pas. Ainsi, en résumé, le maïs hybride Bt a toujours eu de meilleures performances que le maïs hybride conventionnel correspondant, en termes de rendement, coût de production, rentabilité et en terme de capacité de répondre aux besoins de subsistance des familles de fermiers. En se basant sur cette expérience avec le maïs Bt dans des essais multi-localisations, les fermiers de subsistance cultivant du maïs aux Philippines ont exprimé leur intérêt et leur volonté d'adopter le maïs Bt à cause des rendements supérieurs et des besoins plus faibles en pesticides. Des essais en champ ont indiqué une augmentation de rendement d'environ 25 % en faveur du maïs Bt pendant la saison sèche et de 40 % durant la saison humide.

Inde

L'Inde cultive environ 6 millions d'hectares avec une production nette de 7,5 millions de tonnes et un rendement faible de 1,2 tonnes/hectare. La plus grande superficie de maïs est située dans l'Etat de l'Uttar Pradesh avec 1,2 millions d'hectares, suivi par le Rajasthan, Madhya Pradesh et Bihar, chacun avec 800'000 hectares. Le foreur ponctué des graminées (*Chilo partellus*) et le légionnaire uniponctué sont des nuisibles importants (Hill 1983). Des pertes de 20 à 87 % sont rapportées pour le foreur ponctué des graminées (Mathur 1998), de 30 % pour le légionnaire uniponctué et de 5 (Jayaraj 1990) à 37 % (Dhaliwal and Arora 1996) pour la noctuelle. La pyrale asiatique n'est pas un nuisible important en Inde mais les *Sesamia spp.* peuvent l'être. Bien que les pertes puissent être fortes pour des nuisibles pris individuellement avec des fortes infestations, Dhaliwal and Arora (1996) estiment qu'en moyenne, les pertes dues aux divers insectes nuisibles représentent un modeste 5 %. Aucune information provenant d'essais en champs avec du maïs Bt n'est actuellement disponible pour estimer le gain de production du maïs Bt. En examinant en détail les tendances de la production et les estimations des pertes dues aux insectes par an durant les années 1970 et 1990, les pertes dues aux

stress biotiques sont en augmentation régulière et en se basant sur l'expérience d'autres pays en Asie, les gains de production pourraient bien être plus élevés que les pertes de production estimées à 5 % pour tous les insectes (table 30).

Au début des années 1970, la production de maïs en Inde était environ de 6 millions de tonnes et elle a doublé pour atteindre 12 millions de tonnes en 2002. Avec une productivité augmentée, les insectes nuisibles exercent un ravage considérable en termes de perte de culture mesurée en kg/hectare et ouvrent de nouvelles opportunités pour déployer la nouvelle technologie Bt du maïs qui peut fournir un bénéfice significatif pour le fermier.

Afrique

Les résultats d'alimentation de larves rapportés par l'Afrique du Sud confirment que le gène *cry1Ab* fourni un contrôle efficace à la fois contre le foreur ponctué des graminées (*Chilo partellus*) et contre la noctuelle foreuse (*Busseola fusca*). Le nombre de larves de *Busseola fusca* qui ont survécu après 10 jours étaient de 7 contre 0,2 pour le Bt. De manière similaire, seules 0,5 larves de *Chilo partellus* ont survécu sur le maïs Bt contre 8 sur le contrôle (Kirsten and Gouse 2003). En se basant sur l'analyse de la production de maïs jaune Bt, l'augmentation de rendement en faveur du maïs Bt est de l'ordre de 10 % (Kirsten and Gouse, 2003). La rentabilité était plus élevée pour le maïs Bt, soit 86 Rands/hectare, malgré une majoration de 60 % pour les semences de maïs Bt, qui est plus que compensée par les économies réalisées sur les insecticides (Kirsten and Gouse 2003). Le revenu net provenant du maïs Bt est estimé à 250 Rands/hectare, supérieur à celui du maïs conventionnel cultivé dans des conditions d'irrigation et de 190 Rands/hectare (7 Rand = US \$1.00) pour une culture sans irrigation (table 29).

Une grande étude détaillée des fermiers a été réalisée sur une base nationale pour estimer les pertes dues aux chenilles foreuses au Kenya en 1998 (De Groot 2002). La moyenne des pertes de production était estimée à 12,9% soit 0,39 millions de tonne/hectare, ce qui équivaut à une perte

nationale au Kenya de 76 millions de \$. Le niveau des pertes de culture était élevé (15 à 21 %) dans les zones de maïs à faible potentiel et plus faible (10 à 12 %) dans les zones de maïs à fort potentiel. Etant donné que les pourcentages de pertes sont plus faibles dans les zones à production élevée, avec des pourcentages de pertes plus élevés dans les zones de production plus faible, le niveau absolu de perte/hectare était assez constant pour les deux zones de 315 à 374 kg/hectare. Les zones sèches de moyenne altitude où les pertes sont d'environ la moitié, soit 175 kg/hectare, étaient une exception. Au niveau de la ferme dans la principale zone de culture du maïs, les valeurs des pertes varient de 61 à 75 \$/hectare à cause des chenilles foreuses et de 34 \$/hectare dans les zones sèches de moyenne altitude. Les chenilles foreuses les plus importantes au Kenya sont la noctuelle foreuse (*Busseola fusca*), très répandues dans les montagnes plus froides, et le foreur ponctué des graminées (*Chilo partellus*), que l'on trouve dans les plaines tropicales plus chaudes. Un troisième foreur, le foreur de tige africain (*Sesamia calamistis*) se trouve à des altitudes de plus de 2'600 mètres (De Groot 2002).

Dans une publication ultérieure, De Groot et al. (2003) estiment que les pertes annuelles dues aux chenilles foreuses au Kenya sont en moyenne de 13,5 % soit 0,4 millions de tonnes estimées à 80 millions de dollars américains, sur quatre saisons de culture en 2000 et 2001. Le projet Maïs Résistant aux Insectes pour l'Afrique (IRMA - Insect Resistant Maize for Africa) financé par la Fondation Syngenta et mis en œuvre par l'Institut de Recherches Agricoles du Kenya (KARI - Kenyan Agricultural Research Institute) et le CIMMYT, était créé au Kenya pour développer un maïs Bt pour le Kenya. Jusqu'à maintenant, les gènes Bt avec des résistances à *Chilo partellus*, *Chilo orichalcocillellus*, *Eldana sacharina* et *Sesamia calamistis* ont été introduits avec succès dans la lignée d'élite de maïs CML 216 du CIMMYT et testés biologiquement au Kenya. Cependant, un gène Bt qui confère un contrôle biologique complet pour *Busseola fusca*, la noctuelle foreuse africaine, n'a pas encore été identifié et c'est la chenille foreuse la plus importante au Kenya dans les zones de

production de transition fortement humides (De Groote et al.2003). *Chilo partellus* est le foreur le plus important dans la zone à faible potentiel, dans les régions humides de moyenne altitude et les zones sèches de moyenne altitudes et les plaines tropicales. Pour autant qu'un gène Bt efficace contre *Busseola fusca* puisse être identifié et incorporé avec succès, des pertes de l'ordre de 48 millions de \$ par an pourront être évitées à comparer aux 23 millions de \$ pour *Chilo partellus*. On estime que si le projet de maïs Bt IRMA développe une résistance à tous les principaux foreurs du maïs au Kenya, le taux interne de retour sur investissement sur une période de 25 ans sera de 208 milliards de \$, à comparer avec les 5,7 millions de \$ de coût du projet (De Groote et al.2003).

Au Cameroun, Cardwell et al. (1997) ont rapporté que la noctuelle foreuse africaine était l'espèce la plus importante, suivie par la pyrale africaine de la canne à sucre. En se basant sur les informations de ces études et le travail de Aquino et al. (1999), De Groote (2002) estime que les pertes de récolte dues aux chenilles foreuses au niveau national au Cameroun à 14 %.

Au Ghana, le travail de recherche de Gounou et al. (1994) conclu que les pertes dues aux foreurs du maïs étaient de 14 à 17 % dans les zones de savanes et de 27 % dans les zones de forêts pluviales.

En Ethiopie, une étude détaillée des foreurs du maïs indique que les pertes dues aux chenilles foreuses étaient de l'ordre de 8 à 9 % avec une moyenne d'infestation de 1,8 larves par plante (Ferdu 1991). Ainsi, en Afrique, généralement, les pertes dues aux chenilles foreuses causées par *Busseola fusca* et *Chilo partellus* varient de 8 à 14 %.

Résumé

La revue de la littérature sur les estimations des pertes et des gains de production associés avec le gène Bt *cry1Ab* pour différentes régions ou pays du monde déjà présentée dans cette section est résumé dans la table 30. Il faut être prudent en interprétant les pertes observées dans les essais en champs, qui

sont souvent localisés dans les zones les plus infestées et donc peuvent sur-estimer les pertes. En tenant compte de la variabilité inhérente de telles analyses, utilisation des essais et étude des résultats, des gains modestes (5 %) sont représentatifs de la plupart des environnements tempérés d'Amérique du Nord et d'Europe, alors que des gains plus importants (10 % au moins) sont typiques pour les régions tropicales et sub-tropicales d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine. Cette caractéristique est cohérente avec le fait que, dans les zones tempérées, le nombre de générations de nuisibles par an et les infestations de foreurs sont plus faibles que dans les zones tropicales. Etant donné que, jusqu'à aujourd'hui, les essais en champs ont été réalisés avec des variétés portant le gène *cry1Ab*, les gains enregistrés sont en grande partie dus au contrôle des foreurs et, dans une certaine mesure, en relation avec le contrôle du légionnaire d'automne et des vers de l'épi de maïs. Cependant cela ne comprend pas le contrôle des chrysomèles et des vers gris car ces nuisibles ne sont pas ciblés par *cry1Ab*. Ces gains d'une moyenne de 5 % dans les zones tempérées et de 10 % dans les zones tropicales devraient augmenter avec la disponibilité de nouveaux gènes Bt ou autres, ce qui devrait aboutir à un contrôle plus large et plus efficace des principaux nuisibles autres que les foreurs. Le premier de ces gènes Bt, *cry3Bb1*, qui contrôle les chrysomèles a été récemment déployé aux USA pour 2003 et une évaluation préliminaire des gains de production associés avec cet événement est étudié plus loin dans cette section. Le gène *cry1Fa2*, qui a été déployé pour la première fois en 2003 aux USA, apporte un contrôle amélioré et plus efficace du légionnaire uniponctué, de la noctuelle ypsilon et une résistance intermédiaire à la noctuelle (*Helicoverpa armigera*). Alors que les données permettant l'évaluation des bénéfices de production pour la nouvelle génération de gènes, *cry3Bb1* et *cry1Fa2*, deviennent disponibles, il est prévu d'évaluer, par une étude de suivi, les bénéfices supplémentaires mis en avant qui seront réalisés avec le déploiement des nouveaux gènes Bt ou autres qui fourniront un contrôle plus efficace sur un éventail de nuisible plus large au niveau mondial.

9.3 Evaluation préliminaire des pertes dues aux chrysomèles aux USA et les gains associés avec le déploiement du gène Bt cryBb1

Etant donné que le maïs Bt *cry3Bb1* pour le contrôle des chrysomèles n'a été commercialisé pour la première fois qu'en 2003 aux USA et que la base de données pour évaluer les pertes de récolte et pour projeter les bénéfices est petite, cette évaluation ne sera qu'une analyse préliminaire en vue de réaliser une évaluation plus détaillée après quelques années de commercialisation.

Les chrysomèles infestent actuellement plus de 20 millions d'hectares au total dans les Amériques et elles ont été détectées dans 13 pays en Europe (cf. Figure 4). Dans les Amériques, les chrysomèles ont infecté 13 millions d'hectares aux USA, 5 millions d'hectares au Brésil, 1 million d'hectares chacun pour le Canada et le Mexique et 0,1 millions d'hectares en Argentine (table 31).

Les deux espèces de chrysomèles les plus importantes aux USA sont la chrysomèle des racines de l'ouest (*Diabrotica virgifera, virgifera*) et la chrysomèle des racines du nord (*Diabrotica barberi*) qui causent de sérieuses pertes. Initialement, la rotation avec le soja était un moyen efficace de contrôler les chrysomèles mais l'émergence d'un variant du soja, qui a résulté dans une attaque de chrysomèles durant la première année de maïs, et l'apparition d'un deuxième variant avec une diapause plus longue a érodé la protection fournie par la rotation avec le soja. De plus, le développement d'une résistance à de nombreux insecticides utilisés pour contrôler les chrysomèles a réduit les options de contrôle en utilisant des insecticides et des rotations.

Le Service de Recherches Agricoles (ARS 2001) estime que, en moyenne, les chrysomèles du maïs entraînent des pertes annuelles de récolte et des coûts de contrôle évalués à 1 milliard de \$ par an aux USA. La superficie infestée aux USA est de 13 millions d'hectares parmi lesquels environ 6 hectares (estimé à 5,7 millions d'hectares en 2000)

Table 29. Rentabilité du maïs Bt par rapport au maïs conventionnel en Afrique du Sud

Système de production	Bénéfice (Rands/hectare), par rapport aux variétés conventionnelles
Irrigué	250
Sans irrigation	190

Source: Kirsten and Gouse, 2003.

sont traités avec des insecticides pour le contrôle des chrysomèles du maïs. On estime que le gène *cry3Bb1* augmente la production de 9 à 28 % en comparaison avec du maïs conventionnel non traité et de 1,5 à 4,5 % (moyenne 3 %) par rapport au maïs conventionnel traité avec un insecticide de sol pour le contrôle des chrysomèles du maïs (Mitchell 2002, Rice 2003, Glick and Pershing 2003). Cependant, la prudence s'impose en évaluant les effets sur la production à ce stade précoce parce qu'ils sont basés sur des évaluations préliminaires. En 2000, on estime que les fermiers dépensaient environ 30 \$/hectare pour des insecticides servant à contrôler la chrysomèle du maïs soit un coût total de 171 millions de \$ (Alston et al.2002) ce qui correspond à 3,4 millions de kg d'i.a. d'insecticide. C'est la plus forte utilisation pour un seul insecte nuisible aux USA et cela représente environ 60 à 80 % de tous les insecticides utilisés pour le maïs aux USA. En se basant sur les prix internationaux du maïs (108 \$/tonne), une augmentation de 3 % du rendement, malgré l'application des insecticides, serait équivalent à 750 millions de \$ plus 170 millions de \$ pour les insecticides (sans les coûts d'application) pour un total de 920 millions de \$ ou environ 1 milliard de \$, ce qui est cohérent avec l'estimation de l'USDA.

Au niveau de la ferme, en assumant l'hypothèse que le coût de contrôle est le même que l'on utilise les insecticides ou le gène *cry3Bb1*, les études indiquent que le contrôle avec Bt va augmenter la rentabilité de 20 \$/hectare quand les niveaux d'infestation sont faibles et de 72 \$/hectare lors de niveaux d'infestations élevés (Glick and Pershing 2003).

EVALUATION DÉTAILLÉE DU MAÏS BT

Table 30. Résumé des gains de production en faveur du maïs Bt (*cryIAb*) et estimations des pertes dues aux chenilles foreuses

Pays	Année	Données	Gain/Perte de production par hectares *	Référence
AMERICAS				
USA	1997-2000	28 Etudes	+1-14, Gain moyen 5%	Marra et al 2002
USA	1995-2002	8'900 comparaisons	Gain moyen 5%	Industry source 2003a
USA	2001	Etude détaillée	Perte 3%	Gianessi et al 2003
Honduras	2002	Essais dans 4 régions	6-21%, Gain moyen 13%	Industry source 2003f
Argentine	1990s-2002	1'500 données ponctuelles	gain moyen 10%	Industry source 2003c
Argentine	2000-2003	Expériences	Gain moyen 8%	Industry source 2003d
Brésil	1999-2001	Expériences	Gain moyen 24%	Industry source 2003e
EUROPE				
Espagne	2002	Etude détaillée et Essais	+5-7% sur infestation de 36%	Brookes, 2002
Espagne	2001	Etude détaillée et Essais	Moyen, 5-7% au niveau national	Gianessi et al 2002
Espagne	1998	9 Essais en champ	gain moyen 11%	Novillo et al, 2003
Espagne	1997	Essais dans toutes les régions	3 to 13%, Gain moyen 6%	Alcade, 1999
Espagne	1995	Essais	Pertes 9%, eq. à 941 kg/ha	Garcia Olmedo, 2003
Allemagne	1998-2002	Essais	Gain moyen 15%	Degenhardt et al, 2003
Allemagne	1999	Essais	Gain moyen 12%	Magg et al 2000
Italie	-	Etude détaillée	Perte moyenne 7 à 15%	Manchini, 2003
Italie	1993	Etude détaillée	Perte moyenne 8%	Onorato and Snidaro, 1993
Italie	1997	Etude détaillée/Essais	5 à 20%, Perte moyenne 10%	Industry source 2003b
France	1970	Etude détaillée	Jusqu'à 15% de perte moyenne	Anglade and Rautou, 1970
AFRICA				
Afrique du Sud		Essais	Gain moyen d'environ 10%	Kirsten and Gouse, 2003
Kenya	2000/2001	Etude détaillée/Expériences	Perte moyenne 13,5%	De Groote et al 2003
Kenya	1998	Etude détaillée	Perte moyenne 13%	De Groote 2002
Ghana	1990s	Etude détaillée	Perte moyenne 14%	Aquino et al 1999
Cameroun	1990s	Etude détaillée	Perte moyenne 14 à 17% dans la savane	Gounou et al 1994, Cardwell et al 1997
Ethiopie	1991	Etude détaillée	Moyenne 8-9% (1,8 larves/plante)	Ferdu, 1991
ASIE				
Chine	2003	Etude des foreurs d'Asie	Perte moyenne 5-7-10%	Wang, 2003
Chine	2002	Etude de la Pyrale asiatique	Perte moyenne 5-7% (6 à 9 millions tonnes de pertes/an sur 1 production de 125 millions de tonnes en 2002)	He et al., 2003

Table 30 (suite). Résumé des gains de production en faveur du maïs Bt (*cryIAb*) et estimations des pertes dues aux chenilles foreuses

Pays	Année	Données	Gain/Perte de production par hectares *	Référence
Chine	2000-2001	Expériences en champ	Gain moyen 9,3%	Wang, 2003
Chine	1998	Essais en champ (gouvernement)	Gain moyen 23%	Industry source 2003i
Chine	1998	10 Iso-lignées, 2 expériences	Gain moyen 17%	Industry source 2003h
Chine	1998	Expériences	7-20% Gain moyen 10%	Industry source 2003g
Chine	1997	Expériences en champ	Gain moyen 19%	Industry source 2003j
Inde	1996	Etude détaillée	Perte moyenne 5% pour tous les nuisibles du maïs	Dhaliwal and Ramesh Arora, 1996
Phillippines	2001/2002	Essais	gain 25 à 40%	Gonzalez, 2002
Thaïlande	2003	Etude détaillée	Perte 2 à 3%	Narong, 2003

Source: Rassemblé par Clive James à partir d'une revue de la littérature, les citations spécifiques sont indiquées dans le corps de la table.

* Les gains de production du maïs Bt sont calculés à partir des essais en champs en comparant le maïs Bt au maïs non-Bt. Les estimations des % de pertes de récolte proviennent des études en champs pour les chenilles foreuses.

Ainsi, le bénéfice moyen lié à l'utilisation du maïs Bt est estimé à 42 \$/hectare pour un total de 168 millions de \$ pour 4 millions d'hectares. Dans ce bénéfice substantiel, ne sont pas compris les avantages supplémentaires très importants pour les fermiers qu'ils obtiennent lorsqu'ils utilisent la technologie Bt plutôt que les insecticides, comme le confort, la flexibilité et l'efficacité, une diminution des risques ainsi qu'une assurance concernant les pertes de récolte et une exposition plus faible aux pesticides des fermiers et de l'environnement.

Une étude ex-ante conduite par Alston et al. (2002), a estimé que l'impact de la technologie Bt *cry3Bb1*, se basant sur l'hypothèse que le coût du Bt est le même que celui du contrôle avec des insecticides, sur les 100% de la superficie de maïs traitée avec des insecticides afin de contrôler les chrysomèles du maïs en 2000. L'étude prévoit un bénéfice total de 460 millions de \$ dont 231 millions de \$ découlent de l'augmentation du rendement, 58 millions de \$ supplémentaires découlent du gain de temps, des risques réduits et des autres bénéfices associés avec la réduction des insecticides soit un bénéfice total de 289 millions de \$ pour les fermiers, ce qui équivaut aux deux-tiers (63 %) du surplus total de 460

millions de \$. Ceux qui ont développé la technologie et l'industrie des semences bénéficient de la différence de 171 millions de \$ soit environ un tiers (37 %) des bénéfices totaux (table 32).

Les données des essais en champs et les ex-ante disponible pour les USA pour le maïs contenant le gène *cry3Bb1* ne sont pas disponibles pour les autres marchés potentiels à court-terme (Brésil, Canada et Argentine), pour lequel le potentiel est significatif étant donné que plus de 6 millions d'hectares de maïs au total sont déjà infestés dans les trois pays. En Europe, pour le long terme, les pertes dues à la chrysomèle du maïs pourraient s'intensifier si le niveau actuel d'infestation augmentait, que les pertes devenaient plus fortes dans les 13 pays déjà infestés durant la dernière décennie et que les autres pays devenaient infestés.

9.4 Bénéfices obtenus grâce au contrôle des chrysomèles par le maïs avec *Cry3Bb1*

Il faut être prudent en interprétant les données de pertes de récoltes dues aux chrysomèles du maïs

présentées ici pour les USA, qui doivent être considérées comme une évaluation préliminaire, car les données sont basées sur les premières évaluations des essais en champs et des preuves des études ex-dante basées sur les données de 2000. Cependant, il est évident que le contrôle des chrysomèles du maïs via la technologie Bt offre des avantages agronomiques, économiques et environnementaux énormes, dont les fermiers et la société en général ne peuvent que bénéficier. Le principal bénéfice attendu du gène *cry3Bb1* aux USA est estimé comme suit (Alston et al.2003, Glick and Pershing 2003, Rice 2003):

- Augmentation du rendement de 1,5 à 4 % ce qui se traduit, pour les USA, par un bénéfice national de 168 millions de dollars soit 42 \$/hectare sur 4 millions d'hectares.
- Augmentation de l'efficacité de la gestion évaluée à 41 millions de \$ aux USA, soit 10,32 \$/hectare.
- Diminution de l'utilisation d'insecticide estimée à 2'400 tonnes i.a. aux USA soit 0,6 kg/hectare.
- Réduction des déchets environnementaux via l'élimination de 1 million de containers plastiques en moins.
- Réduction de la consommation énergétique équivalente à 21,9 millions de litres de fuel.
- Réduction de la consommation d'eau équivalente à 21,2 millions de litres.

10. Le marché mondial des insecticides destinés au maïs

En 2001, le marché mondial des insecticides pour les 140 millions d'hectares de maïs était approximativement de 10'750 tonnes d'i.a., pour une valeur de plus de 550 millions de \$ (table 33). Ceci doit être comparé avec le plus grand marché d'insecticide au monde concernant une seule plante

cultivée, le coton, pour laquelle 80'000 tonnes d'insecticides, soit une valeur de 1,7 milliards de \$, sont utilisées sur 35 millions d'hectares. Dans le marché mondial des insecticides pour le maïs en 2001, l'Amérique du Nord représentait 40 % du marché mondial, suivie par l'Amérique Latine avec 25 %, puis l'Europe, l'Extrême-Orient/Asie-Pacifique et le reste du monde avec environ 10 % chacun. Les plus grands marchés sont, de loin, les USA avec 4'337 tonnes et le Brésil avec 2'069 tonnes, qui, à eux deux, représentent 60 % du marché mondial des insecticides pour le maïs. Le marché de l'Extrême-Orient/Asie-Pacifique (1'400 tonnes) est relativement petit si l'on considère que l'Asie représente 40 % de la superficie mondiale des 140 millions d'hectare de maïs avec la Chine, l'Inde et l'Indonésie qui dominent dans la production de maïs. Le marché européen est de 1'075 tonnes dont la majorité (700 tonnes) est utilisé en France, Espagne, Italie et Grèce ; le restant (375 tonnes) est utilisé en Europe de l'Est.

Des différences marquées existent entre les deux grands marchés pour les insecticides du maïs des USA et du Brésil. Pour les USA, on estime qu'environ 80 % de tous les insecticides du maïs sont appliqués sur le sol, pour lutter contre le principal nuisible, la chrysomèle du maïs. Le cas du Brésil est différent : 45 % seulement des insecticides du maïs sont appliqués sur les sols, parce que les applications sur le sol ne contrôlent pas le principal nuisible, le légionnaire d'automne, mais elles ont un impact sur le scarabée blanc, un nuisible qui fait plus de dégâts que la chrysomèle du maïs au Brésil, qui est aussi présent. Le traitement des semences, qui est plus efficace contre les scarabées que les chrysomèles du maïs, contribue pour 33 % de l'utilisation totale des insecticides du maïs au Brésil, alors qu'elle n'est que de 4% aux USA. Les pulvérisations, qui peuvent contrôler la destruction des feuilles par les noctuelles, représentent 22 % des applications totales d'insecticides au Brésil alors qu'elles ne représentent que 14 % aux USA, où la destruction des feuilles est un problème moins important (table 34).

Table 31. Distribution mondiale de la chrysomèle du maïs.

Millions d'hectares infestés dans les Amériques :		Pays où elle a été détectée en Europe:	
USA	13,0	Yugoslavie	Royaume Uni
Brésil	5,0	Bulgarie	Hongrie
Canada	1,0	Italie	Roumanie
Mexique	1,0	France	Suisse
Argentine	0,1	Ukraine	Slovaquie
		Pays Bas	Autriche
		République tchèque	
Total	20,1	13 pays	

Source: Glick and Pershing, 2003.

Table 32. Estimation de la distribution des bénéfices découlant du déploiement du maïs Bt *cry3Bb1* aux USA dans une simulation pour l'année 2000

Bénéfices et Bénéficiaires	Millions de \$US	%
Augmentation de production	231	50
Autres bénéfices pour le fermier	58	13
Sous-total des bénéfices pour le fermier	289	63
Développement de la technologie/Industrie des semences	271	37
Total	460	100

Source: Alston et al, 2002

Les USA sont le plus grand marché des insecticides du maïs (4'337 tonnes) dans le monde. En 2001, 60% de tous les insecticides du maïs (table 35), soit 2'472 tonnes ont été utilisés pour contrôler la chrysomèle qui est le nuisible le plus important du maïs. Ils sont principalement appliqués sur le sol, mais des pulvérisations sont aussi effectuées pour contrôler les adultes qui se nourrissent sur les soies et les épis durant la saison de croissance du maïs. L'efficacité de l'utilisation des insecticides pour contrôler les chrysomèles via des applications sur le sol, dépend de l'interaction avec la variable «conditions écologiques du sol» qui a un impact sur la toxicité, la volatilité et la solubilité des ingrédients actifs. Cependant le contrôle peut être irrégulier car ces facteurs peuvent varier avec les méthodes d'applications, les formules, les conditions de sol et les conditions climatiques.

Plusieurs insecticides sont recommandés pour les chrysomèles du maïs aux USA, parmi lesquels les organo-phosphates et les pyréthoïdes représentent 80 % du produit (Glick and Pershing 2003), principalement à cause des coûts et de l'efficacité. Quelques estimations (Oehme and Pickrell 2003) indiquent que lors des saisons où les infestations par les chrysomèles du maïs sont fortes, 80% de tous les insecticides du maïs utilisés aux USA ciblent ce nuisible. Oehme and Pickrell (2003) rapportent aussi les résultats d'une étude détaillée qui indique que les deux tiers des fermiers utilisant les insecticides pour contrôler les chrysomèles passeraient à un produit Bt si celui-ci était disponible. On estime que, en moyenne, 13 des 32 millions d'hectares de maïs aux USA sont infestés avec les chrysomèles et que 6 millions d'hectares sont traités avec des insecticides. Ceci équivaut à

traiter 18 % des 32 millions d'hectares de maïs aux USA, ce qui en fait la plus grande utilisation d'insecticides pour n'importe quel nuisible aux USA, comptant pour entre 60 et 80 % de l'utilisation totale d'insecticides sur le maïs.

Par opposition à l'usage important d'insecticides aux USA pour lutter contre les chrysomèles du maïs, on estime que moins de 10 % (500 tonnes en 2001), d'insecticide appliqué sur le maïs sont destinés à lutter contre les chenilles foreuses, le second complexe de nuisibles le plus important aux USA, qui comprend principalement la pyrale et la pyrale d'Europe. Par exemple, avant l'introduction du maïs Bt, on estimait que chaque année environ 500'000 hectares en moyenne, soit 2% des 32 millions d'hectares de maïs, étaient traités contre les foreurs. On estime que la pyrale infeste environ 40 % des 32 millions d'hectares de maïs aux USA et peut être responsable de pertes significatives qui peuvent atteindre jusqu'à 7,5 millions de tonnes quand les infestations sont élevées. Cependant, les chenilles foreuses ne sont pas efficacement contrôlées par les insecticides, ce qui conduit les fermiers à appliquer les insecticides seulement quand les infestations sont importantes. Les chenilles foreuses, qui se nourrissent profondément dans la plante de maïs, sont protégées des applications d'insecticides en surface, ce qui rend les pulvérisations inefficaces. Ainsi, sur une base mondiale, on estime que seulement 10 % environ du tonnage mondial des insecticides du maïs de 10'750 tonnes sont utilisés pour le contrôle des chenilles foreuses à cause de la faible efficacité des insecticides. La majorité de ces insecticides est utilisée aux USA et en Europe, avec des marchés relativement petits en Amérique Latine et un peu moins en Asie. Le troisième principal nuisible du maïs aux USA, la noctuelle de la tomate, consomme environ 10 % de tous les insecticides, soit 500 tonnes par an. Le reste, soit 20 % ou environ 870 tonnes, est utilisé pour différents insectes nuisibles, dont l'infestation varie selon les années et les régions.

En ce qui concerne le Brésil, l'autre grand marché pour les insecticides, la situation est tout à fait différente de celle des USA. Les principaux

nuisibles au Brésil sont le légionnaire d'automne qui est présent dans 60 % des 12 millions d'hectares traités. Sur les 12 millions d'hectares de maïs au Brésil, environ 9 millions d'hectares sont utilisés pour la production commerciale d'hybrides à fort rendement, pour lesquels l'utilisation d'insecticides fait partie intégrante de la pratique agronomique. On estime qu'environ 5 millions d'hectares sont infestés par les chrysomèles au Brésil, mais seulement 10 à 25 % des 12 millions d'hectares sont traités avec des insecticides ciblant ce nuisible. De plus, pour contrôler le légionnaire d'automne avec des insecticides, environ 5 à 10 % des superficies totales de maïs sont contrôlées avec des insecticides pour les vers gris, 1 à 10% pour les vers de l'épi de maïs et 5 % pour les foreurs. Le contrôle des chenilles foreuses, du Lépidoptère pyralide et de la pyrale de la canne à sucre nécessite des tracteurs et des équipements spéciaux pour appliquer les insecticides et, malgré cela, le contrôle n'est pas très efficace, donc la plupart des fermiers ne pulvérisent pas contre les foreurs même si leurs infestations peuvent causer des dommages et des pertes importantes.

10.1 Potentiel pour la substitution d'insecticide

Dans une perspective mondiale, l'utilisation des insecticides du maïs est relativement faible avec 10'750 tonnes par an sur 140 millions d'hectares, soit environ 13 % des 80'000 tonnes d'insecticides utilisés annuellement sur le coton, qui consomme plus d'insecticides qu'aucune autre plante cultivée. Le Bt ou les autres nouveaux gènes pour le contrôle des insectes, va affecter l'utilisation d'insecticides dans l'ensemble, à court terme si ils sont ciblés pour contrôler les chrysomèles du maïs aux USA. Une complète substitution des insecticides pour les chrysomèles du maïs avec le Bt remplacerait 2'500 – 3'500 tonnes d'i.a., soit 25 à 30 % du marché mondial des insecticides pour le maïs. Ce qui est cohérent avec l'estimation, que 2'400 tonnes d'i.a. d'insecticides seraient économisées, faite par Glick et Pershing 2003. Les gènes qui confèrent une résistance aux chrysomèles du maïs comprennent le *cry3Bb1* déjà lancé en 2003, le produit avec les deux

Table 33. Valeur et quantité (en tonnes i.a.) du marché mondial des insecticides du maïs par région, 2001

Région/Pays	Millions de \$	Tonnes d'i.a.	%
AMERIQUE DU NORD	266	4'350	(40%)
USA	243	4'337	(40%)
AMERIQUE LATINE	135	2'719	(25%)
Brésil	102	2'069	(19%)
Reste de l'Amérique Latine	33	650	(6%)
Sous-total Amérique du Nord et du Sud	401	7'069	(66%)
EUROPE	85	1'075	(10%)
Europe de l'Ouest*	64		(6.5%)
*France, Espagne, Italie, Grèce sont les principaux utilisateurs	60	700	
Europe de l'Est	21	375	(3.5%)
Sous-total Europe	85	1'075	(10%)
Extrême-Orient/Asie Pacifique	32	1'400	(13%)
RESTE DU MONDE	45	1'200	(11%)
TOTAL MONDIAL	563	10'744	(100%)

Source: Croponosis (anciennement Wood Mackenzie), 2003. Communication personnelle.

Table 34. Mode d'application des insecticides aux USA et au Brésil (en tonnes d'i.a.)

	Application sur le sol	Traitement des semences	Pulvérisation	Total
USA	3'578 (82%)	170 (4%)	589 (14%)	4'337
Brésil	930 (45%)	679 (33%)	460 (22%)	2'069

Source: Croponosis (anciennement Wood Mackenzie), 2003. Communication personnelle.

gènes *cry34Ab1* & *cry35Ab1*, qui devrait être enregistré en 2005 et le gène complet *cry3Aa* modifié attendu pour 2006. Ces trois produits avec de nouveaux gènes pourraient d'ici trois à cinq ans, remplacer de manière substantielle les insecticides utilisés pour lutter contre les chrysomèles du maïs aux USA. Une substitution importante, bien qu'à un niveau plus bas que celle attendue pour les chrysomèles, pourrait aussi avoir un impact sur les insecticides utilisés pour contrôler le légionnaire d'automne, principalement aux Amériques, et plus particulièrement au Brésil, où le légionnaire d'automne est le principal nuisible, contre lequel 1'000 tonnes environ d'insecticides sont appliquées

chaque année.

Ainsi, globalement, la substitution des insecticides utilisés pour lutter contre les noctuelles pourrait être de l'ordre de 1'000 – 1'500 tonnes. Alors que plusieurs produits avec des gènes Bt fournissent un contrôle intermédiaire pour le légionnaire d'automne, les nouveaux hybrides contenant le gène *cry1Fa2*, largement disponible commercialement en 2004, devraient fournir un contrôle très efficace de ce nuisible. Les substitutions des applications d'insecticides utilisées dans la lutte contre les chenilles foreuses, spécialement la pyrale et la pyrale d'Europe, par les nouvelles variétés ont aussi

Table 35. Utilisation des insecticides sur le maïs aux USA, par nuisible, 2001

	Quantité (milliers de tonnes d'i.a.	Exprime en %
1. Chrysomèles du maïs	2'472	57%
2. Pyrales	477	11%
3. Noctuelle de la tomate	520	12%
4. Autres	865	20%
TOTAL	4'334	100%

Source: Croponosis (anciennement Wood Mackenzie), 2003. Communication personnelle.

débutées aux USA (Gianessi et al., 2003). Le potentiel mondial pour ce seul complexe de nuisibles est estimée à 1'000-1'500 tonnes. Finalement, la substitution des insecticides actuellement utilisés pour lutter contre la noctuelle de la tomate, qui est contrôlée partiellement à la fois par le Bt et par les applications d'insecticides, pourrait apporter des économies supplémentaires de 500 à 1'000 tonnes par an. Ainsi, le potentiel mondial pour la substitution des 10'750 tonnes d'insecticides actuellement utilisées pour le maïs, par des produits avec des gènes Bt ou autres, pourrait totaliser de 3 à 5'000 tonnes sur les cinq prochaines années car des produits avec des nouveaux gènes sont commercialisés aux USA. Ce potentiel serait optimisé si le Brésil commercialisait le maïs Bt. Il existe un potentiel important de substitution, équivalent à au moins un tiers du marché actuel des insecticides du maïs de 10'750 tonnes évaluées à 550 millions de \$.

Les estimations concernant la substitution des insecticides ci-dessus reflètent le futur développement d'une tendance à remplacer les insecticides qui a déjà commencé. L'augmentation rapide des plantes transgéniques aux USA et au Canada a coïncidé avec les premières diminutions significatives des ventes de pesticides en Amérique du Nord. En 1999, les ventes ont diminué de 10,9 % soit 7,19 milliards de \$. Beaucoup de facteurs dont le prix modique des denrées de base est aussi responsable de la diminution mais le principal facteur a été l'augmentation de la superficie de plantes cultivées transgéniques. En 1999, l'utilisation des insecticides aux USA a diminué de 5,3 % des 1,38 milliards grâce à l'adoption du maïs et du coton Bt

(Wood Mackenzie Agrochemical Services 2001, communication personnelle).

L'exposition des fermiers aux insecticides reste une préoccupation importante avec 18 à 26'000 cas d'empoisonnements non mortels aux USA chaque année parmi lesquels 8'000 nécessitent une évaluation d'empoisonnements aux organo-phospho-carbonates. Les sondages réalisés auprès des fermiers montrent une forte préférence de ces derniers en faveur du maïs Bt par rapport aux insecticides pour contrôler les nuisibles du maïs. Ceci est confirmé le fait que les fermiers ont adopté le maïs Bt sur 8,5 millions d'hectares pour contrôler la pyrale aux USA en 2002 (Oehme and Pickrell 2003). Il est très probable que les fermiers des USA choisiraient le maïs Bt de préférence aux insecticides pour contrôler les chrysomèles du maïs, et ceci pourrait entraîner une réduction importante jusqu'à 3'500 tonnes avec le temps ainsi qu'une diminution de l'exposition des fermiers aux insecticides. Dans un sondage des fermiers aux USA, 30 % des personnes interrogées indiquent qu'elles espèrent bénéficier de l'exposition plus faible aux pesticides liée à l'utilisation du maïs Bt pour contrôler la chrysomèle du maïs.

Il convient de noter que l'Asie, avec 40 % de la superficie mondiale de maïs, utilise seulement 1'400 tonnes d'insecticides pour le maïs. La pyrale asiatique est connue pour infester une grande proportion des cultures de maïs dans des pays comme la Chine. Mais son contrôle par les insecticides n'est pas très efficace, ce qui fait qu'ils ne sont utilisés que dans les zones où l'infestation est très forte. La faible utilisation des insecticides pour la pyrale asiatique en Extrême-Orient /Asie Pacifique, ne signifie pas que

la gestion des nuisibles n'est pas importante. Au contraire, étant donné les augmentations de production importantes enregistrées pour le maïs Bt en Chine et aux Philippines, l'Asie représente un nouveau marché important pour le maïs Bt que les insecticides n'ont pas été capables de prendre parce qu'ils ont une efficacité trop faible pour contrôler les principaux nuisibles.

Ainsi, en résumé, les principales possibilités pour la substitution des insecticides par le maïs Bt et le maïs contenant de nouveaux gènes de résistance aux nuisibles, concernent essentiellement les chrysomèles du maïs et les noctuelles suivies par les chenilles foreuses et les vers de l'épi de maïs. L'utilisation des biotechnologies, en augmentation continue, pourrait remplacer au moins un tiers des 10'750 tonnes d'i.a. des insecticides utilisés pour cibler ces nuisibles. Les produits Bt ont aussi le potentiel de prendre de nouveaux marchés en Asie et en Amérique Latine, en particulier là où les insecticides ne sont suffisamment efficaces pour contrôler les nuisibles importants comme la pyrale asiatique et la pyrale de la canne à sucre respectivement. Ces nouveaux marchés potentiels pour le maïs Bt deviendront encore plus attractifs lorsque l'augmentation de la productivité accroîtra la valeur de la récolte de maïs par hectare, rendant le déploiement de produits Bt plus attractif et plus rentable pour les fermiers.

11. L'utilisation des gènes Bt dans le maïs

Bacillus thuringiensis (Bt) est une espèce bactérienne formant des spores qui est communément trouvée dans les sols. Le Bt contient une protéine naturelle en forme de cristal qui, lorsqu'elle est ingérée par les insectes nuisibles, cause une paralysie létale du système digestif. Les pulvérisations foliaires sont utilisées depuis 50 ans pour contrôler les insectes nuisibles et elles ont une longue histoire d'utilisation sûre. Les pulvérisations de Bt sont un des rares insecticides autorisés en agriculture biologique.

Table 36. Pourcentage des superficies de maïs traitées avec des insecticides pour les insectes nuisibles cibles au Brésil

Insecte nuisible	% de la superficie totale traité par des insecticides
Légionnaire d'automne	60%
Chrysomèles	10-25%
Vers gris	5 à 10%
Vers de l'épi de maïs	1 à 10%
Foreurs	5%

Source: Sources variées, rassemblées par Clive James 2003.

11.1 Gènes Bt autorisés pour le maïs

Les événements autorisés chez le maïs contiennent le gène de l'isolat de *B. thuringiensis* ssp. *kurstaki* qui produit la protéine Cry1Ab, de *B. thuringiensis* var. *kumamotoensis* qui produit la protéine Cry3Bb1 et de *B. thuringiensis* var. *aizawi* qui produit la protéine Cry1Fa2. Tous les maïs Bt actuellement déployés contiennent un gène synthétique, un promoteur et d'autres séquences - cf. table 54 pour les caractéristiques génétiques des différents événements actuellement utilisés dans les maïs Bt commercialisés.

Les premiers produits de maïs Bt avec le *cry1Ab*, Bt 176, ont été autorisés en 1995 et déployés aux USA en 1996 (Shelton et al., 2002). Les événements contenant le gène *cry1Ab* sont énumérés dans la table 38 qui donne des informations sur les noms des événements, des gènes ainsi que sur les pays dans lesquels ils ont été autorisés. Cela comprend l'événement 176 développé par Syngenta et autorisé aux USA en 1995, au Canada en 1996 et en Argentine en 1998 ; le Bt 11 de Syngenta autorisé en 1996 et le MON 810, développé par Monsanto, autorisé en 1996. Monsanto a progressé en demandant l'autorisation pour le MON 810 au Canada et en Afrique du Sud en 1997, en Argentine et dans l'Union Européenne en 1998, en Bulgarie en 2000, aux Philippines et au Honduras (pré-commercialisation) en 2002 et à l'Uruguay en 2003. De même, Syngenta a poursuivi en demandant

l'autorisation pour le Bt au Canada et au Japon en 1996, et en Argentine en 2001.

Le gène *cryIAb* est généralement destiné à lutter contre la famille des chenilles foreuses qui sont des nuisibles économiques dans les pays dans lesquels le maïs Bt est cultivé commercialement aujourd'hui (USA, Canada, Argentine, Honduras, Afrique du Sud, Espagne, Allemagne et Philippines). Parmi les trois événements contenant le gène *cryIAb* (MON 810, Bt 176 et Bt 11), on estime que le MON 810 représente plus de 80% du maïs Bt planté en 2002.

Un événement qui n'apparaît pas dans la table 37 est l'événement CBH-351 qui contient le gène *cry9C* pour le contrôle de la pyrale. L'événement, connu sous le nom de StarLink, a été autorisé pour l'utilisation en alimentation animale seulement et uniquement aux USA. Il a été volontairement retiré plus tard par son développeur, Aventis CropScience. Même si, cet événement n'est plus autorisé, pour l'exhaustivité de ce rapport, une vue générale des développements relatifs à StarLink est présenté ici. En septembre 2000, des représentants des organisations américaines de consommateurs ont rapporté que le maïs StarLink a été détecté dans un produit alimentaire humain, Kraft's Taco Bell tortillas. Parce que StarLink n'avait pas été autorisé pour l'alimentation humaine, un rappel volontaire de tous les produits qui pouvaient contenir du maïs StarLink a été initié suite à la détection non-vérfiée.

Alors que les autres variétés de maïs avec un gène Bt ont été autorisées aux USA et sont cultivées commercialement, les variétés de maïs StarLink sont les seules variétés commercialisées contenant la protéine Cry9c. Le maïs StarLink a été cultivé sur environ un-demi pour cent de toutes les superficies de maïs aux USA en 2000. C'était la seule variété de maïs Bt autorisée pour l'utilisation en alimentation animale sans autorisation simultanée pour l'utilisation dans l'alimentation humaine. Bien qu'il n'y ait pas de risques de santé connus associés avec StarLink, quelques questions concernant son potentiel allergénique restaient sans réponse.

L'Agence de Protection de l'Environnement a

convoqué une réunion du groupe spécial de conseil scientifique (SAP) en Juillet 2001 pour évaluer l'information disponible au sujet du maïs StarLink. Le rapport final a réaffirmé les conclusions précédentes du groupe et a donné de nouvelles recommandations. Le groupe a quand même conclu qu'il y avait «une faible probabilité d'allergénicité» dans la population exposée en se basant sur les niveaux du maïs StarLink dans la diète aux USA. Le groupe a avalisé la conclusion de l'USEPA selon laquelle presque toutes les protéines Cry9C seraient enlevées des produits lors du processus de meunerie du maïs par voie humide. De plus, le groupe a déclaré qu'il n'y avait pas assez d'informations pour établir avec une certitude scientifique que l'exposition ne serait pas nocive pour la santé publique et ils n'ont pas pu établir un niveau de tolérance spécifique pour le Cry9C. Par conséquent, en se basant sur les recommandations du groupe, il n'a pas été possible d'établir une tolérance pour la présence de StarLink dans les produits pour la consommation humaine. Le SAP était aussi d'accord avec les estimations de l'EPA selon lesquelles le maïs StarLink serait essentiellement éliminé de l'approvisionnement américain en grain de maïs pour 2002 (USEPA 2001). Le produit n'est plus planté et l'enregistrement du maïs StarLink a été enlevé. Des informations supplémentaires peuvent être trouvées sur le site Internet du CAST (www.cast-science.org/biotechnology/20000925.htm) et sur celui de l'USEPA (<http://www.epa.gov/opppppd1/biopesticides/index.htm>).

En se basant sur l'expérience du maïs StarLink, le protocole suivant s'applique désormais : l'USEPA ne délivrera un enregistrement pour un produit biotech que si les franchises de tolérance pour les protectants incorporés dans les plantes (PIP) tant pour la consommation humaine que pour l'alimentation animale sont confirmées scientifiquement. Il a aussi été proposé que l'USEPA exige que des méthodes de test pour détecter les PIP, validées dans les grains et les fractions modifiées, soient disponibles avant l'enregistrement et que l'USDA mette en place des laboratoires qui valideront commercialement les méthodes disponibles pour détecter les PIP dans les produits de grains destinés au commerce interne et à

l'exportation. Les règles du PIP, effectives en septembre 2001, clarifient le fait que le DNA du PIP est exempté des besoins de tolérance.

L'information de la table 39 fournit les données LC_{50} pour la sensibilité des Lépidoptères aux delta-endotoxines Cry1Ab exprimées lors du nourrissage par une diète artificielle de quelques importants insectes nuisibles du maïs. Il est évident que les faibles valeurs LC_{50} pour la pyrale d'Europe, le légionnaire de la betterave et la pyrale sont des indicateurs pour le contrôle efficace de ces nuisibles tandis que les fortes valeurs de LC_{50} pour la noctuelle ypsilon et le légionnaire d'automne indiquent une suppression plutôt qu'un contrôle efficace. Le gène *cry1Ab* est exprimé dans les tissus de maïs tout au long du cycle du maïs fournissant un contrôle tout au long de la saison.

Même si le gène *cry* est le même dans les événements MON 810, Bt 11 et 176, l'expression de la protéine Bt est affectée par la construction du gène qui est introduit dans un événement spécifique. L'expression est aussi influencée par les conditions dans lesquelles le maïs est cultivé et par les infestations de nuisibles qui se développent. Par exemple, l'événement 176 contient des niveaux plus faibles de la protéine *Cry1Ab* dans les feuilles que le Bt 11 ou le MON 810. Cette protéine n'est pas exprimée dans le grain et cela conduit donc à une faible protection pour les infestations des épis.

Le niveau de contrôle estimé pour différents nuisibles au niveau du champ dans différents pays pour l'événement MON 810, le plus largement déployé mondialement, est montré dans la table 40. Un contrôle excellent et efficace est fourni pour la pyrale, la pyrale d'Europe, la pyrale de la canne à sucre, la pyrale que l'on trouve au sud des USA (*Diatraea crambidoides*), la pyrale asiatique, *Chilo* spp. et la noctuelle de la tomate au stade du verticille. De plus, les nuisibles suivants sont soit supprimés, soit fortement contrôlés : noctuelle de la tomate (épi), légionnaire d'automne (verticille et épi) avec un contrôle variable de la noctuelle foreuse africaine et quelques espèces de *Sesamia* comme *S. inferens*.

Pour résumer, les avantages du gène *cry1Ab* dans les maïs Bt par rapport à l'application des insecticides sont les suivants :

- Les protéines actives fournissent une dose de contrôle modérée à forte qui permet un contrôle considérable à excellent pour une sélection de Lépidoptères nuisibles importants,
- Les protéines actives sont exprimées dans les parties de la plante qui sont susceptibles d'être attaquées par les insectes nuisibles ciblés,
- Les protéines actives sont exprimées tout au long de la saison, ce qui fait que le choix du bon moment pour l'application des insecticides en relation avec une infestation n'est plus une préoccupation,
- Le lessivage des insecticides durant les pluies et la dégradation par le soleil ne sont pas des préoccupations comme elles le sont avec les formules de pulvérisations,
- Réduction de l'exposition des fermiers aux insecticides,
- Technologie économisant du travail, à cause de l'élimination ou de la réduction des pulvérisations d'insecticides,
- Diminue les risques de production et fournit aux fermiers une tranquillité d'esprit et l'assurance de contrôles efficaces
- Contribue à et fournit les bases d'une stratégie IPM.

11.2 Les gènes Bt récemment libérés

Evénement MON 863

Une addition plus récente à la famille des gènes Bt du maïs vient de l'autorisation début 2003 de MON863 aux USA et au Canada qui permettait

Table 37. Utilisation des insecticides sur le maïs aux USA, par nuisible, 2001

Événement	Gènes	Promoteur et Séquence
MON 810	<i>cry1Ab</i> (<i>Bacillus thuringiensis</i> subs. <i>kurstaki</i>)	CaMV 35S amplifié ; intron mize HSP70
Bt 176	<i>cry1Ab</i> (<i>Bacillus thuringiensis</i> subs. <i>kurstaki</i> , <i>Btk</i>)	1 copie du gène : gène de la phosphoénolpyruvate carboxylase du maïs et le terminateur CaMV35S; Copie du gène 2 : gène de la protéine kinase calcium-dépendante et le CaMV 35S
Bt 11	<i>cry1Ab</i> (delta-endotoxine) (<i>Btk</i> HD-1) (<i>S. viridochromogenes</i>)	CaMv 35S; Intron IVS 6 du gène de la déhydrogénase alcoolique du maïs
MON 863	<i>cry3Bb1</i> isolé à partir de <i>B.t</i> subsp. <i>Kumamotoensis</i> (B.t.k.)	Promoteur CaMV 35 S, Intron de la séquence de l'actine 1 du riz (ractl)
TC1507	<i>cry1Fa2</i> (<i>cry1F</i> delta-endotoxine de <i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>aizawai</i>) de ORF25	

Source: Carpenter et al.2002, modifié

l'introduction de Yield Gard® Chrysomèle aux USA en 2003. MON 863 contient le gène Bt *cry3Bb1* qui fournit un contrôle efficace pour la chrysomèle des racines du maïs, nuisible très important du maïs aux USA, qui consomme plus d'insecticides que n'importe quel autre nuisible aux USA. Il infeste aussi des surfaces importantes au Brésil, Canada, Mexique et en Argentine. Durant les prochaines années, la disponibilité du caractère chrysomèle des racines du maïs devrait contribuer à une croissance significative des superficies de maïs aux USA, où environ 18% de la superficie de maïs de 32 millions d'hectares, sont actuellement traités avec des insecticides pour contrôler la chrysomèle des racines de maïs et sont, donc, susceptibles de bénéficier rapidement de la technologie. Il y a un recouvrement important entre les superficies infestées avec la pyrale et celles infestées par la chrysomèle des racines de maïs et ainsi quelques-uns des nouveaux produits devront avoir des empilements de gènes afin de contrôler ces deux nuisibles importants ainsi que d'autres Lépidoptères secondaires. La superficie

mondiale de maïs Bt, y compris les empilements de gènes, est susceptible d'augmenter de manière significative à court-terme. L'expansion du maïs Bt sur la superficie mondiale de 140 millions d'hectares se produira principalement en implantant le maïs Bt *cry1Ab* dans les marchés nationaux de pays comme les USA, le Canada, l'Afrique du Sud ou l'Argentine. Le maïs Bt avec le gène *cry1Ab* va aussi augmenter dans des nouveaux pays comme les Philippines qui ont introduit le maïs Bt jaune pour la première fois en 2003 pour le contrôle de la pyrale asiatique et le Honduras qui a cultivé du maïs Bt en 2002 dans des essais pré-commerciaux.

Événement TC 1507

L'événement TC 1507 est aussi un nouvel ajout aux options de maïs Bt, autorisée aux USA en 2001 et en 2002 au Canada et au Japon. La commercialisation a commencé en 2003 aux USA, la commercialisation à grande échelle en Amérique du Nord est prévue pour 2004. L'événement TC 1507 contient le gène

Table 38. Événements du maïs Bt qui ont été autorisés pour la plantation commerciale

Événement	Gènes	Année d'autorisation	Pays	Nom du produit	Firme
MON 810	<i>cry1Ab</i>	1996 1997 1997 1998 1998 2000 2002 2003	USA Canada Afrique du Sud Argentine EU Bulgarie Philippines Uruguay	YieldGard® Pyrale	Monsanto
Bt 11	<i>cry1Ab</i>	1996 1996 1996 2001	USA Canada Japon Argentine	YieldGard®	Syngenta
176	<i>cry1Ab</i>	1995 1996 1997 1998	USA Canada EU* Argentine	Knockout®	Syngenta
MON 863	<i>cry3Bb1</i>	2003 2003	USA Canada	YieldGard® Chrysomèles	Monsanto
TC 1507	<i>cry1Fa2</i>	2001 2002	USA Canada Japon	Herculex® 1	Pioneer Hi-Bred - Dupont et Mycogen Seeds - Dow Agro Sci.

Source: Benedict and Ring (In Press) (modifié). * autorisé par l'inscription d'hybrides qui ont été enregistrés en France, Espagne et Portugal; cultivé sur plus de 500 hectares en Allemagne.

cry1Fa2 qui fournit un large spectre d'activité y compris une excellente protection contre la 1^{ère} et la 2^{ème} génération de pyrale, de pyrale d'Europe, de légionnaire d'automne, de la Noctuelle ypsilon, *Richia albicosta* et une suppression intermédiaire du ver de l'épi de maïs (table 41).

Sélection d'empilement de gènes

Suite à l'introduction du maïs exprimant le premier gène Bt en 1996, les développeurs de technologie ont commencé à combiner ou empiler les gènes Bt avec des gènes pour la tolérance aux herbicides. Le procédé d'empilement répond aux besoins des

fermiers qui habituellement doivent faire face à de multiples contraintes en relation avec des stress biotiques dus à des nuisibles, des mauvaises herbes et des maladies au même moment. L'empilement est une orientation qui devient plus répandue au fur et à mesure que de nouveaux gènes deviennent disponibles, non seulement pour les stress biotiques mais aussi pour les stress abiotiques comme la sécheresse ou la salinité, et les caractères qui améliorent les qualités nutritionnelles. L'empilement de gènes comportant différents mécanismes de résistance dans une variété offre la possibilité d'optimiser la diversité et par conséquent la durabilité des gènes de résistance pour un nuisible

particulier ou un groupe de nuisibles et de les déployer dans le contexte d'une stratégie IPM. Ceci a déjà été réalisé avec le développement du coton Bollgard® II qui a des gènes doubles pour la résistance aux Lépidoptères avec deux modes d'action différents. Comme la seconde génération de gènes pour les insectes devient disponible chez le maïs, un développement parallèle du coton Bt sera réalisé. **Quelques** uns de ces nouveaux produits sont discutés dans la section suivante, qui résume les prochaines générations de gènes pour le contrôle des insectes nuisibles chez le maïs.

11.3 Nouvelle génération de gènes de résistance aux insectes chez le maïs

Il y a cinq nouveaux produits en attente, soumis à l'autorisation légale qui devraient être lancés entre 2004 et 2006. Ils sont énumérés dans la table 42.

1) *Yield Gard® Plus – Lancement prévu, 2004*

Ce produit, en développement chez Monsanto, combine deux gènes *cry1Ab* et *cry3Bb1*, qui ont tous les deux déjà été autorisés et commercialisés comme événement simple (MON810 et MON863). Il est prévu que Monsanto offre trois produits aux fermiers américains cultivant le maïs : avec un seul gène *cry1Ab* (YieldGard® pyrale), avec un seul gène *cry3Bb1* (YieldGard® chrysomèle) et avec les deux gènes *cry1Ab* et *cry3Bb1* combinés (YieldGard® Plus). Ces options coïncident avec différents besoins des fermiers : certains n'ont besoin que de contrôler la pyrale avec *cry1Ab*, d'autres ont besoin de contrôler les chrysomèles (*cry3Bb1*) alors que d'autres ont besoin de contrôler à la fois la pyrale et les chrysomèles avec les gènes empilés *cry1Ab* et *cry3Bb1*. Ce dernier représente un marché potentiellement important à cause de la grande superposition des zones infestées tant avec la pyrale qu'avec les chrysomèles aux USA.

2) *Les gènes cry34Ab1/cry35Ab1 pour le contrôle des chrysomèles des racines du maïs – lancement prévu, 2005*

Dow AgroSciences a développé un produit qui

utilise deux gènes Bt différents ensemble, *cry34Ab1* et *cry35Ab1* pour contrôler la chrysomèle des racines du maïs. Le mode d'action des produits des deux gènes est complémentaire et il est similaire aux gènes *cry1* (Moellenbeck et al.2001). Dow AgroSciences et Mycogen Seeds, en collaboration avec Pioneer Hi-Bred International/ DuPont espèrent lancer ce produit en 2005, l'autorisation légale est attendue. Ce produit procure une source différente de MON 863 pour la résistance à la chrysomèle des racines du maïs, basée sur un mode de résistance différent.

3) *Gène cry1Ab entier – lancement prévu en 2005*

Ce produit en développement par Syngenta est destiné au contrôle de la pyrale et sera un ajout aux produits qui sont déjà déployés pour le contrôle de cet important insecte nuisible.

4) *Empilement de gènes entiers cry1Ab et vip3A – lancement prévu, 2006*

Ce produit avec des gènes empilés, en cours de développement chez Syngenta, est destiné à fournir un contrôle pour un large éventail de Lépidoptères nuisibles. En plus du gène *cry1Ab* qui figure déjà dans plusieurs produits déployés, il incorpore un nouveau gène *vip3A* qui procure de la diversité en terme de mécanisme de résistance. Soumis à une autorisation légale, son lancement est prévu pour 2006.

5) *Gène entier modifié cry3Aa – lancement prévu, 2006*

Ce produit en cours de développement chez Syngenta est destiné au contrôle de la chrysomèle des racines du maïs et comporte un nouveau gène *cry3Aa*. L'autorisation est en attente, le lancement est prévu pour 2006, période à laquelle il devrait rejoindre deux autres produits (*cry3Bb1*) lancés en 2003 et *cry 34Ab1/cry35Ab1* dont le lancement est prévu en 2005.

On a déjà montré une augmentation rapide du nombre de gènes et des modes d'action des gènes disponibles pour contrôler les insectes nuisibles du maïs ainsi qu'un élargissement du nombre de nuisibles qui peuvent être contrôlés efficacement.

Table 39. Efficacité de la protéine Cry1Ab dans le contrôle d'insectes nuisibles du maïs de la famille des Lépidoptères : sensibilité aigüe à la protéine endotoxine Cry1Ab

Insecte nuisible	LC ₅₀ (µg/g)
Pyrale d'Europe	0,08-0,15
Légionnaire de la betterave	3,18
Noctuelle de la tomate	3,45
Pyrale	3,60
Noctuelle ypsilon	>80,00
Légionnaire d'automne	95,89

Source: Wolt et al. 2003, basé sur les données de Chakrabarti et al., 1998, Luttrell et al., 1999 et MacIntosh et al., 1990.

Table 40. Performance de MON810 (*cry1Ab*) pour contrôler des insectes nuisibles du maïs sélectionnés dans du maïs Yield Gard®

Insecte nuisible	Contrôle Intermédiaire/Suppression
Pyrale	Noctuelle de la tomate (épi)
Pyrale d'Europe	Légionnaire d'automne (verticille et épi)
Pyrale de la canne à sucre	Noctuelle foreuse africaine
Pyrale que l'on trouve au sud des USA (<i>Diatraea crambidoides</i>)	Quelques <i>Sesamia spp.</i> par ex. <i>inferens</i>
Noctuelle de la tomate (verticille)	
Pyrale asiatique <i>Chilo spp.</i>	

Source: Communication personnelle, 2003.

Ainsi, le premier gène *cry1Ab* utilisé pour contrôler la pyrale et d'autres Lépidoptères nuisibles sélectionnés a été renforcé en terme de variétés différentes disponibles pour les fermiers comportant des gènes comme le gène *cryIFa2* puis plus tard le gène *cry1Ab* complet et aussi un produit avec les gènes *cry1Ab* et *vip3A*, pour fournir une diversité dans les modes de résistance. Cette diversité plus grande dans les modes d'action des gènes de résistance est une contribution déterminante pour une gestion efficace et sérieuse des résistances dans le contexte d'une stratégie IRM afin de contrôler efficacement les Lépidoptères nuisibles. De manière similaire, le premier gène déployé pour la chrysomèle des racines du maïs devrait être complémentaire avec différentes variétés sur le marché. Ces variétés, disponibles pour les fermiers, contiennent d'autres gènes qui seront inclus dans des produits comme celui qui comportera un double gène *34Ab1* et *35Ab1* prévu pour 2005 ou celui qui contiendra le gène *cry3Aa* entier modifié dès 2006. Les gènes doubles dans les produits comme *cry1Ab/cry3Bb1* fournissent un contrôle des Lépidoptères nuisibles sélectionnés et des chrysomèles des racines du maïs. Ce sont des développements très encourageants qui offrent l'assurance et la confiance que la biotechnologie est capable de contribuer rapidement à la diversité des résistances nécessaires, ce qui est une condition préalable pour faire une stratégie IRM efficace et responsable permettant l'optimisation de la durabilité des gènes de résistance. En pratique, ceci permettra aux fermiers d'avoir accès à plus grand nombre d'options qui s'adapteront mieux à leurs besoins spécifiques pour la gestion des nuisibles. Ceci est très important, spécialement pour le maïs domestiqué, qui est cultivé dans un plus grand nombre d'environnements différents que n'importe quelle autre céréale domestiquée et, de ce fait, nécessite un éventail d'options plus large qui sera offert par les nouvelles génération de gènes de résistance aux nuisibles. La même philosophie, consistant à optimiser les possibilités, s'applique à tous les gènes de qualité qui deviendront disponibles en temps utile chez le maïs, approvisionneront les différents marchés du maïs des secteurs alimentation humaine ou animale et utilisation industrielle et seront cultivés dans

quatre méga-environnements très différents (tropical, sub-tropical, montagneux et tempéré). De toutes les plantes GM, le maïs sera probablement celle qui offrira le plus d'options en termes de différentes combinaisons de gènes de gestion des nuisibles et de qualité pour convenir à des marchés très différents. D'ailleurs, la biotechnologie offre déjà un très large éventail d'options pour la gestion des nuisibles et elle s'approche d'un stade où elle pourra mieux adapter sa série de gènes de résistance aux insectes au développement du germplasm du maïs en réponse directe à la demande qui se base sur les besoins des divers marchés mondiaux du maïs

12. Effets potentiels du maïs Bt sur l'environnement

Beaucoup d'efforts ont été investis dans des expérimentations rigoureuses permettant de générer des données scientifiques qui serviront à la société et aux régulateurs pour examiner tous les effets potentiels concevables que le maïs Bt pourrait avoir sur l'environnement. Ces études ont été réalisées par les membres de la communauté scientifique universitaire aussi bien que par les développeurs de la technologie et les chercheurs gouvernementaux, afin de satisfaire les besoins de réglementation et des standards scientifiques établis par la société. Les études incluent les effets potentiels sur les organismes non-cibles, le flux de gènes des plantes cultivées GM vers les races locales et les espèces sauvages apparentées et le potentiel d'affecter la biodiversité. Les fermiers biologiques sont préoccupés par les flux de transgènes qui pourraient diminuer la valeur de leurs produits certifiés biologiques. Des études ont aussi été réalisées sur l'effet potentiel du maïs Bt sur l'eau de surface et du sol ainsi que sur les aquifères, ce qui comprend aussi les implications liées à la plus faible utilisation d'insecticides rendus superflus par la culture de maïs Bt.

12.1 Effets potentiels sur les organismes non-cibles

Table 41. Efficacité du TC 1507 avec le gène *cry1Fa2* dans le maïs Bt Herculex® 1

Contrôle Excellent/ Efficace	Contrôle partiel/ Suppression
Pyrale Pyrale d'Europe Noctuelle ypsilon Légionnaire d'automne <i>Richia albicosta</i>	Noctuelle de la tomate

Source: Dow AgroSciences, 2003.

Avant l'enregistrement du premier maïs Bt en 1995, l'USEPA a fait des évaluations détaillées approfondies des études sur les effets potentiels des protéines Cry et a conclu que le maïs Bt n'a pas d'effets négatifs inacceptables sur les organismes non-cibles (USEPA 1995). En 1999, des préoccupations similaires selon lesquelles le pollen du maïs Bt était préjudiciable aux populations nord-américaines du papillon Monarque ont conduit à des tests supplémentaires de grande ampleur en laboratoire et en champs, réalisés par les scientifiques des universités et des gouvernements qui ont conclu que les affirmations selon lesquelles le Monarque était en danger ne pouvaient pas être soutenues. Il a été prouvé que des allégations similaires sur les possibles effets négatifs du maïs Bt sur les populations de papillon du céleri et de chrysope étaient non fondées (Shelton et al.2002, Williams et al.1998, Wraight et al.2000). L'expérience concernant le papillon Monarque est détaillée plus tard dans cette section.

La conclusion générale des nombreuses expériences qui ont été réalisées pour déterminer l'effet potentiel du maïs Bt sur les espèces non-cibles, est qu'aucune étude ne montre qu'il y a un effet négatif sur les organismes non-cibles. En effet, en comparaison avec l'application d'insecticides à large spectre, qui sont connus pour avoir un impact négatif sur les insectes utiles non-cibles, y compris les prédateurs des nuisibles du maïs (Carpenter et al.2002), le déploiement du maïs Bt a entraîné une amélioration marquée pour les populations d'insectes prédateurs utiles dans les champs de maïs Bt. De plus, étant

Table 42. Futurs gènes pour les produits conférant une résistance aux insectes nuisibles du maïs

Source du gène	Principal insecte nuisible ciblé	Compagnie (s)	Nom du produit Lancement prévu
<i>cry1Ab</i> et <i>cry3Bb1</i>	Chrysomèles des racines du maïs et Lépidoptères nuisibles sélectionnés	Monsanto	Yield Gard® Plus 2004
<i>cry34Ab1</i> et <i>cry35Ab1</i>	Chrysomèles des racines du maïs	Dow AgroSciences/ Pioneer-DuPont/Mycogen Seeds	2005
<i>cry1Ab</i> (entier)	Pyrale	Syngenta	2005
Empilement des gènes <i>cry1Ab</i> et <i>vip3A</i> entiers	Large éventail de Lépidoptères nuisibles	Syngenta	2006
Gène <i>cry3Aa</i> entier, modifié	Chrysomèles des racines du maïs	Syngenta	2006

Source: Informations données par les compagnies respectives et rassemblées par Clive James, 2003.

donné que seuls les insectes de l'ordre des Lépidoptères sont sensibles aux protéines Bt *Cry 1* et qu'il n'y a pas de prédateurs de la famille des Lépidoptères pour les nuisibles du maïs, il ne peut pas y avoir d'effet direct de l'expression de *Cry1Ab* dans le maïs Bt utilisé sur 43 millions d'hectares durant les sept dernières années. Des effets indirects sur les prédateurs sont possibles mais aucun n'a été vérifié. Les protéines Bt *Cry3* utilisées pour le contrôle des chrysomèles des racines de maïs ont une action seulement pour un ordre d'insectes et dans ce cas, elles sont seulement actives sur les coléoptères (ordre *Coleoptera*). Le déploiement de nouveaux gènes Bt pour contrôler les chrysomèles appartient à l'ordre des coléoptères (*Coleoptera*) qui ne comprend pas les coléoptères qui sont des prédateurs des nuisibles du maïs, a aussi été testé abondamment pour les impacts possibles sur les non-cibles. Les populations de ces insectes utiles sont toujours surveillées maintenant que le maïs contenant ces gènes Bt est planté commercialement en Amérique du Nord. Deux publications récentes ont constaté que le pollen de maïs de plantes exprimant le gène *Cry3Bb1* n'affecte pas la vigueur d'une espèce non-cible importante, *Coleomegilla*

maculata De Geer, qui est un prédateur polyphage important chez le maïs (Lundgren and Wiedenmann 2002, Duan et al.2002). Le résumé des rapports publiés sur les effets potentiels du maïs Bt sur les organismes non-cibles, y compris les prédateurs utiles, est présenté dans la table 43. Aucune de ces publications, examinées par des spécialistes, n'indique des effets délétères de la protéine *Cry1Ab* sur les organismes non-cibles. La protéine *Cry1Ab* exprimée chez le maïs fourni un contrôle efficace de la pyrale et par conséquent, la population d'insectes utiles parasites ou prédateurs se nourrissant exclusivement de la pyrale devrait diminuer en conséquence. Quelques études en laboratoire ont suggéré des effets secondaires indirects sur les prédateurs des pyrales, mais ces études utilisent des diètes artificielles avec des concentrations de toxines Bt supérieures à celles que l'on observe dans le maïs Bt et, ainsi, l'extrapolation directe n'est pas appropriée. La surveillance des champs de maïs Bt commerciaux durant plusieurs années afin de déterminer les impacts sur les organismes utiles non-cibles a confirmé que ces derniers n'étaient pas affectés négativement.

L'expérience du papillon Monarque

Des spéculations et des extrapolations prématurées faites par des voies critiques vis-à-vis des biotechnologies concernant le travail rapporté il y a deux ans par Losey and coworkers (Losey et al.1999) ont conduit aux conclusions alarmantes fortement diffusées selon lesquelles les chenilles du papillon Monarque étaient empoisonnées et tuées par le pollen des plantations à but lucratif de maïs Bt aux USA (Anonymous 2001). Un ensemble de six articles publiés par l'Académie Nationale des Sciences des USA (Hellmich et al.2001, Oberhauser et al.2001, Pleasants et al.2001, Sears et al.2001, Stanley-Horn et al.2001 and Zangerl et al.2001) a conclu, ensemble, que contrairement à ce qui avait été déclaré plus tôt, le maïs Bt planté aux USA n'était pas nocif pour les chenilles du papillon Monarque qui se nourrissent sur les laitrons sur lesquels le pollen de maïs est déposé.

De manière plus spécifique, il y a cinq principales découvertes dans l'ensemble des six articles qui soutiennent la découverte que le pollen de maïs Bt n'est pas un danger pour les populations de papillon Monarque. Premièrement, avec la possible exception d'un événement Bt (qui occupe seulement 2% du maïs Bt aux USA et qui a, par la suite, été retiré des ventes commerciales pour d'autres raisons), le maïs Bt cultivé à des fins commerciales aux USA ne pose pas de risques toxiques significatifs pour les chenilles de Monarques (Hellmich et al.2001). Deuxièmement, il a été montré (Pleasants et al.2001) que le pollen de maïs tend à s'accumuler sur les feuilles médianes du laitron, alors que les chenilles du Monarque ont tendance à se nourrir sur les feuilles supérieures. Troisièmement, cette plus faible densité du pollen Bt sur les feuilles supérieures n'entraîne pas une toxicité significative pour les chenilles (Sears et al.2001). Quatrièmement, il a été démontré que la pratique actuelle consistant à appliquer des insecticides à large spectre pour contrôler les insectes nuisibles du maïs affecte les Monarques avec le même potentiel que les autres technologies y compris les plantes transgéniques (Oberhauser et al.2001). En dernier, l'effet destructeur des insecticides à large spectre a été confirmé par Stanley-Horn et al. (2001) qui ont

montré que l'insecticide actuel, largement utilisé sur le maïs, le lambda-cyhalothrine, a, contrairement au maïs Bt, un effet préjudiciable sur les papillons Monarques. Collectivement, les résultats de l'ensemble des six articles confirment les premières évaluations de l'EPA sur le risque potentiel posé par le maïs Bt sur les papillons non-cibles et les phalènes (Ortman et al.2001).

Pour résoudre le problème selon lequel le maïs Bt affecterait d'autres organismes non-cibles potentiels, l'USEPA a aussi réalisé des évaluations de risques de routine pour la toxicité écologique générale, qui incluent des études de toxicité sur les espèces aviaires (caille), sur des espèces aquatiques (poisson-chat, daphnies), des insectes utiles (abeille, guêpe parasitaires, chrysope verte commune, coccinelles), des invertébrés du sol (collembolles et vers de terre) et des mammifères (souris) (USEPA 1995, 2000, 2001). Ces tests fournissent une base pour évaluer la toxicité potentielle sur les espèces non-cibles et les organismes indicateurs et servir de base pour développer des études à long-terme (Ortman *et al.*2001).

Dans un développement parallèle, un groupe de 22 éminents entomologistes et écologistes du maïs a écrit une lettre collective à l'éditeur de *Bioscience* (Ortman *et al.*, 2001). Ces scientifiques étaient en désaccord avec certaines conclusions de l'article précédent (Obrycki 2001) publié in *Bioscience*, qui était crucial pour le maïs Bt. Le groupe de scientifiques a indiqué que la communauté scientifique a examiné de manière plus rigoureuse les risques et les bénéfices des plantes Bt que cela n'a été fait pour aucune autre application des biotechnologies, ainsi que cela ressort de l'énorme quantité de littérature, de discussions scientifiques et des nombreuses réunions publiques facilitées par l'USEPA, le Département Américain de l'Agriculture (USDA) et l'Administration Américaine des aliments et des Drogues (FDA) faites à ce sujet.

Les 22 scientifiques ont relaté que «les preuves jusqu'à présent soutiennent l'utilisation appropriée du maïs Bt comme un composant dans la gestion

économiquement et écologiquement judicieuse des Lépidoptères nuisibles». Le groupe a conclu que la performance du maïs Bt a validé les précédentes évaluations de la technologie positives de l'USEPA et mis en évidence le fait que les effets positifs et négatifs des nouvelles technologies doivent être comparés aux meilleures pratiques actuelles. Il a mis en garde contre le rejet de la technologie en tant que telle, simplement parce qu'elle est nouvelle. Une publication de Shelton and Sears (2001) illustre les interprétations scientifiques portant sur la controverse du papillon Monarque. Les auteurs ont conclu « nous croyons qu'une vue rétroactive pourrait être utile afin de donner des éclaircissements sur les rôles adéquats et les responsabilités des scientifiques, des médias et des agences publiques ainsi que les conséquences lorsque cela tourne mal ».

Les leçons à retenir de l'expérience concernant le papillon Monarque sont que les déductions concernant les impacts des nouvelles technologies au niveau du champ sont prématurées si elles sont uniquement basées sur des extrapolations à partir d'expériences en laboratoire et que toutes les allégations doivent être vérifiées dans le champ avant d'émettre des conclusions. De plus, ces informations fallacieuses peuvent entraîner des opinions publiques durables et incorrectes qui peuvent retarder ou empêcher le déploiement d'une technologie utile comme le maïs Bt même si le produit offre à la société des bénéfices environnementaux et de production importants. Le maïs Bt offre des bénéfices significatifs réels aux écosystèmes et à la santé humaine, y compris ceux associés avec la réduction de l'utilisation d'insecticides foliaires à large spectre (AMA 2000, APS 2001, NRC 2000).

12.2 Flux de Gènes

La préoccupation selon laquelle le transgène présent dans les plantes cultivées GM pourrait passer, via un croisement, dans un germplasma conventionnel, des races locales ou des espèces apparentées a été au centre d'une importante controverse ces deux

dernières années. Pour les espèces sauvages, la préoccupation est que l'introgession du transgène puisse avoir un impact sur la totalité du germplasma sauvage, avec un impact potentiel sur la biodiversité, y compris le développement de ce que l'on appelle les «super mauvaises herbes». Le souci est que le transgène confère un avantage sélectif qui pourrait potentiellement permettre à l'hybride de coloniser la terre au dépens d'autres espèces moins compétitives. Snow et al. (2002) ont rapporté que les hybrides Bt de tournesol produisent plus de graines que les hybrides conventionnels mais aucune augmentation de la compétitivité dans des situations environnementales naturelles n'a été démontrée. Des preuves expérimentales indiquent des conclusions inverses, c.-à-d. que les plantes GM, y compris le maïs Bt, n'auraient aucun avantage sélectif (Crawley et al. 2001). Les questions relatives au flux de gènes sont plus pertinentes si la plante cultivée est allogame, par opposition à autogame ou auto-pollinisée, et si il y a beaucoup d'espèces apparentées sauvages, avec lesquelles la plante cultivée GM est compatible, qui poussent dans les zones de production commerciale, permettant ainsi la production d'hybrides fertiles.

Le maïs est une plante cultivée allogame. Une seule espèce sauvage apparentée, la téosinte, se croise avec elle. Cependant, la direction du flux de gènes est de la téosinte vers le maïs et non l'inverse, du maïs vers la téosinte, à cause de barrières génétiques qui agissent pour limiter l'introgession des gènes de maïs dans la téosinte (Evans and Kermicle 2001). De plus, la téosinte est restreinte à des zones environnementales spécifiques du Mexique, du Guatemala et du Nicaragua qui ont toutes été cartographiées. Ainsi, il est vain de se préoccuper des croisements du maïs avec des espèces sauvages apparentées dans toutes les zones de production du maïs dans le monde et il est prématuré de tirer des conclusions pour le Mexique. Aux USA, il existe une espèce de graminées fourragères, l'herbe rasoir, *Tripsacum dactyloides*, qui peut se croiser avec le maïs selon l'USDA/APHIS mais les hybrides sont habituellement stériles ou ont une vigueur hybride réduite, ce qui ne donne pas de possibilités d'introgession dans la population de graminées

Table 43. Résumé des rapports publiés sur les effets potentiels du maïs Bt exprimant la protéine Cry1Ab sur les organismes non-cibles et les prédateurs

Etudes et Conclusions	Référence
1. Aucune différence dans la population de carabes (<i>Carabidae</i>) entre les maïs Bt et non-Bt.	Lozzia and Rigamonti 1998
2. Confirmation des résultats de l'étude 1 ci-dessus.	Lozzia 1999
3. Pas de différence significative dans le nombre de prédateurs entre les maïs Bt et non-Bt.	Orr and Landis 1997
4. Pas de différences significatives observées dans les populations de l'espèce <i>Orius</i> , un prédateur de la pyrale et des thrips.	Al-Deeb, Wilde and Higgins 2001
5. Pas d'effets indirects sur <i>Orius</i> , un prédateur des thrips.	Zwahlen et al.2000
6. Pas d'effets nuisibles du maïs Bt sur les prédateurs.	Pilcher et al.1997
7. Etude en laboratoire indiquant un temps de développement plus long pour les larves de chrysopes. Cependant, l'extrapolation aux conditions de champs n'est pas confirmée par les données de Hillbeck.	Hilbeck et al.1998
8. Les résultats suggèrent un effet négatif du maïs Bt sur les chrysopes vertes communes mais seules les larves du stage deuxième « instar » sont significativement touchées et aucune dose d'effet de réponse n'a été trouvée pour le <i>Cry1Ab</i> . Les conclusions sont contraires aux études similaires de Lozzia 1997 et autres.	Hilbeck et al.1999
9. Niveau non-significatif de <i>Cry1Ab</i> chez les pucerons verts du maïs et chez les noctuelles ypsilon, qui sont tous les deux des insectes proies, quand ils se nourrissent sur le maïs Bt, par conséquent les effets indirects du maïs Bt sur les insectes prédateurs sont négligeables.	Head et al.2001
10. Etant donné le faible niveau de la toxine Bt dans les aphides qui se nourrissent sur le maïs Bt, les effets indirects du maïs Bt sur les prédateurs d'aphides, comme les coccinelles, sont probablement nuls.	Raps et al.2001
11. L'alimentation de <i>Chrysoperla carnea</i> avec des <i>Tetranychus urticae</i> qui contiennent la protéine <i>Cry1Ab</i> et de <i>Rhopalosiphum padi</i> qui n'ingère pas la toxine, n'affecte pas la survie de <i>C. carnea</i> bien qu'une augmentation de la mortalité ait été indiquée lorsque <i>C. carnea</i> se nourrit sur des larves de <i>Spodoptera littoralis</i> élevées sur le maïs Bt.	Dutton et al.2002

fourragères. Les autres facteurs importants en relation avec le flux de gènes du maïs GM vers le maïs conventionnel sont le mode de dispersion des graines et le flux de pollen. Si l'ancêtre du maïs, la téosinte, a la capacité de disperser elle-même ses graines, ce n'est pas le cas du maïs. Le flux de pollen du maïs est réduit, globalement, à moins de 220 mètres (Bauman and Crane 1985). Cette information est fondée sur une expérience à long-terme utilisant une séparation de 220 mètres pour la production de semences hybrides certifiées aux USA (Jarvis and Hodgkin 1999) alors que 350 mètres sont considérés par quelques-uns comme une séparation plus appropriée qui fournirait une assurance supplémentaire.

Races locales de maïs au Mexique

Suite à la publication d'une lettre de Quist and Chapela (2001) dans *Nature*, le monde s'est préoccupé de l'introgression du promoteur CaMV35S, utilisé dans les événements MON 810 et Bt 11 pour le maïs Bt, dans les races locales au Mexique. La conclusion de Quist and Chapela très diffusée était basée sur une procédure inverse des PCR, procédure qui a été mise en cause par le conseil de rédaction du « *Journal of Transgenic Research* » (Christou 2002) et par deux publications dans « *Nature* » (Kaplinsky et al. 2002, et Metz and Futterer 2002). Malgré le fait que Quist and Chapela aient publié plus tard des preuves (Quist and Chapela 2002), les critiques n'ont pas été satisfaites et ils ont insisté sur le fait que les allégations d'introgression auraient dû être supportées par les répétitions de quelques-uns des tests moléculaires et la germination les hybrides F1 pour donner des preuves décisives.

Après ces diverses contestations, le journal « *Nature* » qui avait publié la lettre originale (Quist and Chapela 2001) a fait des commentaires sur la situation dans une note éditoriale du 4 avril 2002 : « *Nature* a conclu que les preuves disponibles ne sont pas suffisantes pour justifier la publication d'un article original. Comme les auteurs néanmoins souhaitent ne pas revenir sur les preuves disponibles pour leurs conclusions, nous trouvons plus simple,

pour clarifier cette situation, de publier les critiques, les réponses des auteurs et les nouvelles données ainsi que de permettre à nos lecteurs de juger la science par eux-mêmes ».

Le débat a plus été déclenché par la conclusion de Quist and Chapela selon laquelle l'introgression conduirait à une perte de biodiversité que sur le potentiel d'introgression en tant que tel. Cependant, il est important de placer le débat dans le contexte concernant la culture et la gestion du germplasm et des races locales de maïs par les fermiers du Mexique. Contrairement aux USA, où les hybrides sont uniquement utilisés pour la production de maïs, la pratique agricole au Mexique est de cultiver différentes races locales proches les unes des autres dans des conditions où les croisements allogames sont importants. Dans la région Cuzalpa du Mexique, la probabilité de croisements allogames a été estimée à 38 % (Louette 1997). Il est estimé qu'un tiers des variétés locales de maïs ont introgressé des gènes de variétés non-locales ou améliorées (Gonzalez and Goodman 1997). Ainsi, l'idée selon laquelle les races locales sont des sources de biodiversité d'origine est erronée et l'introgression des transgènes devrait être examinée dans le contexte plus large des échanges génétiques massifs qui se sont déjà produits dans les races locales de maïs au Mexique sur une longue période de temps avec l'intervention directe des fermiers dans le processus continu de sélection.

Reconnaissant qu'il est nécessaire de conserver la variabilité génétique des races locales utilisées par les fermiers au fil du temps, des banques de gènes ont été établies pour conserver le matériel pour une utilisation dans les programmes d'amélioration actuels et futurs. Le Centre International pour l'Amélioration du Blé et du Maïs (CIMMYT), basé au Mexique, a une grande banque de gène pour le maïs et a rapporté qu'aucune des 43 races locales Oaxacan ne contient, à un niveau détectable, de promoteur CaMV 35S (CIMMYT 2001).

Au Mexique, un moratoire sur les plantations de maïs transgénique est en vigueur. Une évaluation des implications du débat sur l'introgression et l'impact

potentiel sur la biodiversité est en cours. Il est clair que des flux génétiques se sont produits dans le germplasma du maïs au Mexique sur des générations et que cela continue encore aujourd'hui. Ainsi, il est évident que la façon dont le maïs amélioré est cultivé au Mexique, à proximité des races locales, conduira à des échanges génétiques via la pollinisation croisée avec tous les types de maïs transgéniques ou non. La question la plus pertinente est de savoir quelles sont les implications de ce flux de gènes y compris les échanges avec le maïs Bt. Le Mexique a une forte dépendance culturelle et alimentaire pour le maïs et importe environ 5 millions de tonnes par an pour satisfaire ses besoins. La biotechnologie peut contribuer à augmenter la productivité et le défi pour le gouvernement mexicain est de développer une politique qui lui permettrait de mettre à profit le pouvoir de la nouvelle technologie et parallèlement d'avoir en place une stratégie pour conserver la variabilité génétique du maïs et la biodiversité. Une politique de co-existence, où les localisations in-situ pour la conservation génétique sont identifiées et protégées par des séparations physiques des zones de production commerciale, l'utilisation de maïs conventionnellement améliorés et biotech est une option. La politique de co-existence offre aussi l'option de fournir un isolement dont les producteurs tant du maïs non-GM que du maïs GM ont besoin pour conserver l'intégrité de leurs produits respectifs. Durant ce débat, la voix des petits fermiers de subsistance cultivant des races locales de maïs au Mexique semble ne pas avoir été remarquée ou reléguée à des attentions secondaires. Un effort pour examiner de façon approfondie l'opinion des fermiers de subsistance comme les exécutants qui ont façonné de leurs propres mains les races locales du Mexique et dont les moyens de subsistance dépendent du maïs, semble être une considération importante, qui n'a pas reçu l'attention qu'elle mérite.

Il est important de placer le débat mexicain non résolu en ce qui concerne les races locales de maïs et les espèces apparentées sauvages et les pertes de biodiversité potentielles dans un contexte global. Le Mexique reconnaît la valeur de la diversité

génétique du maïs et a accès à une banque de gènes du maïs qui a conservé le matériel pouvant être utilisé dans les programmes d'amélioration actuels et futurs. Les fermiers de subsistance cultivant du maïs au Mexique ont été engagés activement dans un programme de sélection d'amélioration qui a été sujet à des flux génétiques qui se sont produits via des pollinisations croisées dans leurs variétés à pollinisation ouvertes sur une longue période. Le maïs est un pollinisateur croisé et la téosinte est la seule espèce apparentée compatible avec un potentiel limité d'échange génétique avec le maïs et elle est restreinte au Mexique, Guatemala et Nicaragua. Quatre-vingt quinze pour cent du maïs est cultivé dans plus de 70 pays dans le monde dans des zones où la téosinte ne pousse pas et n'est pas un problème important pour le reste du monde cultivant du maïs. Reconnaissant que le maïs est une plante cultivée principalement allogame, dont les graines ne se dispersent pas toutes seules et le flux de pollen est limité à 350 mètres, les races locales mexicaines ont été sujettes à un flux de gènes du germplasma local vers le germplasma non local durant une longue période et, actuellement, il n'y a pas de preuves concluantes que la biodiversité soit menacée en se basant sur les preuves présentées par Quist et Chapela. Les conclusions de la recherche en cours qui évalue l'impact des implications de la biodiversité au Mexique devrait servir de base au gouvernement mexicain pour mettre en place une politique qui conservera la biodiversité du maïs et accordera au Mexique les importants bénéfices que la biotechnologie des plantes cultivées offre, ceci en collaboration avec des autorités reconnues dans le domaine de la conservation et du développement du germplasma de maïs,

12.3 Impact des protéines *CryIAb* dans le sol et les eaux de surface

Carpenter et al. (2002) concluent que pour la protéine *CryIAb* a un potentiel d'affecter sur l'eau des aquifères, sa présence dans le sol doit être démontrée. Des études ont montré que les protéines *CryIAb* exsudent des racines du maïs Bt (Bt 11 et MON 810) mais la plupart d'entre elles sont

absorbées dans les surfaces argileuses. Les données de la table 44 montrent que les concentrations environnementales de protéines *Cry* sont extrêmement faibles (Crecchio and Stotzky 2001) sans apporter de preuves de sa toxicité pour les vers de terre et les collemboles. En pratique, dans des conditions de champs, les impacts de la protéine *CryIAb* dans les habitats de l'eau de surface sont considérés comme négligeables car il est peu probable qu'elle sera transportée par l'eau s'écoulant et, même si c'est le cas, elle sera probablement désorbée dans la colonne d'eau où elle sera désactivée par l'action des microbes ou du soleil (Carpenter et al.2002).

12.4 Impact du maïs Bt sur la contamination des aquifères par les insecticides

Les superficies de maïs pulvérisées avec des insecticides pour le contrôle des chenilles foreuses aux USA sont relativement petites (2 % des 32 millions d'hectares) en comparaison avec les pulvérisations considérables d'insecticides utilisées pour le contrôle des chrysomèles des racines du maïs. En fait, les insecticides appliqués pour le contrôle de la chrysomèle des racines du maïs représentent la plus grande quantité d'insecticides utilisés tous nuisibles confondus aux USA. Ainsi, l'impact de la protéine *CryIAb* sur environ 8,5 millions d'hectares de maïs Bt aux USA en 2002 n'aura qu'un faible impact sur la diminution des insecticides dans les aquifères. Cependant la situation avec la chrysomèle des racines du maïs est entièrement différente. On estime que jusqu'à 3'400 tonnes d'i.a. d'insecticides sont utilisées annuellement pour contrôler la chrysomèle des racines du maïs aux USA. Donc pour cette raison, le déploiement de MON 863, autorisé en 2003 ainsi que d'autres caractères similaires dans la filière biotech, devrait éventuellement avoir un impact positif important en substituant des quantités minuscules de protéines Bt aux insecticides utilisés sur les 6 millions d'hectares qui sont traités annuellement pour contrôler la chrysomèle des racines du maïs, ce qui, à son tour, diminuera

significativement le taux de résidus d'insecticides qui peuvent pénétrer dans les systèmes d'eau de surface et les aquifères.

Pour mettre les économies potentielles d'insecticides via la substitution par le maïs Bt chrysomèle des racines du maïs dans le contexte, les économies annuelles d'insecticides dues à l'introduction aux USA du coton Bt étaient estimés à environ 1'000 tonnes d'i.a. par an (James 2002b, Benedict and Altman 2001, Carpenter and Gianessi 2002). Les économies potentielles des insecticides de la chrysomèle des racines du maïs de 3'400 kg i.a. par an représentent presque 3,5 fois les économies de 1'000 tonnes d'i.a. associées au coton Bt. L'impact est susceptible d'être particulièrement important parce que les insecticides de la chrysomèle des racines du maïs sont principalement appliqués sur le sol au début du printemps, avant l'émergence des plantes, à une période où les fortes pluies exacerbent l'écoulement dans les systèmes aquatiques où les herbicides peuvent entraîner des effets toxiques sur les invertébrés aquatiques (Carpenter et al.2002).

Ainsi, les diminutions potentielles dans l'utilisation d'insecticides avec le déploiement des gènes Bt pour le contrôle de la chrysomèle des racines du maïs peuvent conduire à des diminutions significatives de l'écoulement des insecticides dans les bassins hydrographiques et les aquifères et généralement dans l'environnement non-agricole. Alors que les insecticides qui sont actuellement autorisés remplissent au moins le minimum des exigences de sécurité environnementale des organismes de surveillance, beaucoup d'insecticides ont des effets létaux sur les organismes non-cibles, y compris les animaux aquatiques dans les étangs et les cours d'eau (Edge et al., 2001). Ceci est une préoccupation particulièrement pour les pays en voie de développement où la surveillance n'est pas toujours entreprise pour détecter la pollution des ressources naturelles.

Plusieurs études récentes aux USA ont utilisé des modèles informatisés, utilisés par l'USEPA pour réaliser des évaluations de risques concernant les impacts potentiels de l'utilisation des pesticides sur

les environnements aquatiques et pour étudier les effets potentiels de la commercialisation des plantes cultivées transgéniques sur la qualité de l'eau dans les aquifères et les cours d'eau. Des prédictions suggèrent que la substitution des insecticides conventionnels par le coton Bt aurait un impact positif sur la qualité de l'eau. Quelques expériences préliminaires de surveillance de la qualité de l'eau ont confirmé les prédictions selon lesquelles les plantes transgéniques auraient impact positif important sur la qualité de l'eau. Les prédictions des modèles informatisés d'Estes et al. (2001), suggèrent que la substitution des insecticides conventionnels par le coton Bt, le maïs Bt et le maïs tolérant aux herbicides soit susceptible d'avoir un impact positif sur la qualité de l'eau en réduisant significativement les concentrations de pesticides dans l'eau du sol et de la surface.

13. Gestion des résistances aux insectes (IRM)

13.1. Résistance aux insecticides

Les situations de la pyrale et de la chrysomèle des racines du maïs sont tout à fait différentes en ce qui concerne le développement de la résistance à des mesures de contrôle variées, spécialement les insecticides chimiques. D'un côté, seule une très petite superficie de maïs aux USA est traitée contre la pyrale, environ 2% soit environ 500'000 hectares et donc la pression de sélection sur la pyrale permettant de développer une résistance sur les insecticides est faible. D'un autre côté, à peu près 18 % du maïs cultivé, soit 6 millions d'hectares, sont traités chaque année pour le contrôle de la chrysomèle des racines du maïs – ceci exerce une pression plus grande et importante sur les chrysomèles des racines de maïs qui peuvent développer une résistance. Les premiers rapports d'apparition d'une résistance chez la chrysomèle des racines du maïs concernaient l'aldrin au Nébraska au début des années 60 (Ball and Weekman 1962). Comme la résistance se dispersait, on a observé que la dispersion se faisait dans la direction sud suivant le déplacement des coléoptères vers le sud dans un

vent dominant qui souffle au nord-ouest. Quand les organophosphates et les carbamates ont remplacé les premiers insecticides, rendus inefficaces à cause de la résistance des chrysomèles, un meilleur contrôle a été obtenu mais au milieu des années 70, ils sont aussi devenus inefficaces. Cependant, dans le cas des insecticides les plus récents, la résistance n'était probablement pas la principale cause d'inefficacité. L'inefficacité était plus probablement due à l'augmentation de la bio-dégradation dans le sol car les insecticides étaient normalement appliqués 30 à 60 jours avant la première couvée de larves. Le phénomène de meilleure bio-dégradation semble être exacerbé par l'utilisation répétée de quelques insecticides (Felsot 1989); le même phénomène a été rapporté au Canada (Suett and Walker 1988). Dans les années 80, une nouvelle stratégie a été introduite : utilisation d'insecticides prophylactiques pour réduire la population de coléoptères adultes de manière à diminuer le nombre d'œufs pondus. Cependant, au fil du temps, la résistance à ces « adulticides » a continué à se développer et durant les dernières années, le carbaryl, souvent utilisé conjointement avec des aliments appâts, était devenu moins efficace pour contrôler pour les chrysomèles des racines de maïs.

13.2 Evolution des chrysomèles des racines du maïs pour vaincre le contrôle par la rotation des espèces cultivées

La chrysomèle des racines du maïs a non seulement, développé une résistance contre les insecticides mais aussi a évolué en des variants dans deux directions pour vaincre la pratique traditionnelle consistant à utiliser des sojas en rotation pour rompre le cycle d'infestation. Premièrement, au début des années 80, on a découvert une souche de chrysomèles des racines de maïs qui prolonge la diapause hivernale habituelle à au moins deux ans et, de ce fait, surmonte la cassure associée avec la rotation d'une année avec le soja (Levine and Oloumi- Sadeghi 1991). Deuxièmement, au milieu des années 90, on a découvert un variant de la chrysomèle des racines du maïs qui pondait ses œufs dans les champs de soja,

Table 44. Comparaison des effets de concentration non-observables (NOEC) dans le sol par rapport aux concentrations environnementales estimées (EEC) des toxines Bt

Maïs Bt dérivé des biotechnologies	EEC (mg/kg de sol)	Vers de terre NOEC (mg protéine/kg sol)	Collemboles NOEC (mg protéine/kg sol)
Monsanto YieldGard: <i>CryIAb</i>	ND	>200	>200
Novartis: <i>CryIAb</i>	0,00042	“non-toxique”	0,08

Source: USEPA 2000; USEPA 2001.

éliminant ainsi les bénéfices d'utiliser le soja comme plante de rotation.

13.3 Gestion du maïs Bt pour le contrôle de la pyrale et de la chrysomèle des racines du maïs

Quel que soit le mode de contrôle des insectes, que ce soit par les insecticides ou par une autre stratégie de gestion des nuisibles, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies qui limitent l'adaptation des nuisibles de manière à préserver les performances et les bénéfices de la gestion des nuisibles. D'où l'importance de développer une stratégie de gestion des résistances des insectes (IRM) avant le déploiement des technologies de contrôle des insectes lorsque les allèles apportant une résistance potentielle sont rares. Les expériences dans le passé avec le développement d'adaptations aux insecticides, les pratiques agricoles et les variétés résistantes amènent à la conclusion que le développement d'une stratégie pro-active, plutôt que réactive, pour la gestion de l'adaptation des insectes dans les plantes cultivées Bt était une approche logique de gestion. Les plans d'IRM ont été mis en œuvre avec succès aux USA tant pour le maïs Bt que pour le coton Bt. Une publication récente (Tabashnik et al., 2003) note que 62 millions d'hectares de plantes cultivées Bt ont été cultivés dans le monde durant les sept dernières années, de 1996 à 2002 (James 2002a) sans qu'une augmentation documentée de la fréquence de résistance, causée par l'exposition aux plantes Bt, ne démontre clairement le succès des programmes IRM qui ont

été mis en œuvre.

Jusqu'à présent, aucune adaptation héréditaire de la pyrale au maïs Bt n'a été découverte aux USA dans les productions commerciales de maïs, malgré que plus de 35 millions d'hectares aient été cultivés aux USA depuis 1996. Cependant, des allèles de résistances possibles chez la pyrale ont été identifiés lors d'études en laboratoire mais il n'a pas été démontré que l'un d'entre eux pourra procurer une adaptation dans des conditions de champs. La mise en œuvre d'une stratégie de conduite IRM efficace avant la libération du maïs Bt a probablement été un facteur majeur qui a empêché le développement de résistances en champ jusqu'à aujourd'hui. Les programmes IRM actuels pour le maïs Bt aux USA sont basés sur la double stratégie de l'utilisation de fortes doses et de la plantation obligatoire de refuges selon les conditions suivantes :

- Les producteurs peuvent planter jusqu'à 80 % de maïs Bt, mais ils doivent planter au moins 20 % de maïs non-Bt comme refuge. Il faut noter que pour le maïs planté dans une zone de production de coton, le taux est de 50 % de maïs Bt pour 50 % de maïs non-Bt puisque la présence de deux plantes cultivées Bt ensemble augmente l'intensité de sélection dans les populations de *Helicoverpa zea*.
- Les zones de refuges ne doivent être traitées avec des insecticides que si le niveau des nuisibles excède les seuils économiques. Les insecticides foliaires Bt ne peuvent pas être

utilisés. On dissuade les fermiers de pulvériser des insecticides dans les refuges car cela pourrait réduire de manière significative l'efficacité des refuges.

- Les zones refuges doivent être placées dans un demi-mile (804,5 m) ou mieux dans un quart de mile (402,25 m) du maïs Bt.
- Dans les champs, les bandes de refuges non-Bt peuvent être utilisées mais leur largeur doit être de quatre rangées au minimum, et de préférence de 6 rangées.
- Mélanger de graines de maïs Bt et non-Bt dans les plantations augmente potentiellement les risques de résistance et cela n'est pas autorisé.

Une politique de refuges similaire à celle du maïs Bt résistant à la pyrale a aussi été utilisée pour le maïs Bt résistant à la chrysomèle des racines de maïs durant le premier déploiement de l'événement *Cry3Bb1* aux USA en 2003. En 1999, l'industrie s'est unifiée pour proposer une stratégie IRM standard pour tous les produits de maïs Bt afin de contrôler les chenilles foreuses en Amérique du Nord. Depuis que l'USEPA et le CFIA (Canada) ont, en premier, autorisé cette proposition, le seul changement majeur a été l'introduction du programme d'assurance de conformité (CAP) qui est conçu pour prendre en main la conformité des producteurs avec les besoins IRM. La pratique de la stratégie IRM pour le maïs Bt est obligatoire aux USA, en tant que partie intégrante de l'enregistrement à l'USEPA et fait partie du contrat que le fermier signe quand il achète les semences.

La gestion de la résistance de la pyrale au maïs Bt comprend l'expression à fortes doses de la protéine Bt ainsi que le déploiement de refuges. La stratégie de fortes doses, ainsi qu'elle a été mise en œuvre pour le maïs Bt exprimant la protéine *Cry1Ab*, se fonde sur des niveaux d'expression de protéines végétales qui sont 25 fois plus élevés que la dose nécessaire pour tuer 99 % des nuisibles cibles sensibles. En pratique, cette forte dose est destinée à

tuer tous les nuisibles hétérozygotes, c.-à-d. les individus qui ont à la fois un gène d'adaptation récessif et un gène sensible dominant. Cette stratégie IRM des refuges à haute-dose se base sur quatre principes (Carpenter et al.2002) :

- Expression à forte dose de la toxine Bt dans les tissus de maïs infestés par le nuisible,
- Hérité récessive,
- Accouplement au hasard entre des insectes sensibles et résistants qui se traduit par la formation d'insectes hétérozygotes sensibles et des insectes résistants non homozygotes et
- Une fréquence initiale du gène résistant faible, moins de 1 pour 500.

Le développement de stratégies IRM varie, non seulement à cause des propriétés de la plante, mais aussi en fonction de la biologie de l'espèce nuisible clé. Par exemple, la nécessité d'un refuge d'une certaine taille, ou d'ailleurs de tout refuge prévu, est aussi influencée par la capacité de l'insecte à survivre sur des plantes autres que le maïs qui poussent aussi dans la zone de production. Ces hôtes alternatifs, qui peuvent inclure des mauvaises herbes ainsi que d'autres plantes cultivées, doivent être capables de produire des individus qui se croisent avec des insectes survivants dans les champs de maïs. D'autres facteurs biologiques, au-delà des hôtes alternatifs, qui doivent être pris en compte lorsque l'on planifie une stratégie IRM comprennent les mouvements et la migration des insectes, le devenir de l'accouplement, générations par an et diversité de la zone cultivée.

En même temps que la mise en œuvre d'une stratégie IRM pour le maïs aux USA, l'USEPA a aussi imposé aux développeurs de technologie la mise en place d'un programme de surveillance permettant de suivre la sensibilité du nuisible au fil du temps de sorte que l'on puisse mettre en œuvre en temps utile des actions efficaces si la résistance se développe (USEPA 2001). Tant les organisations

privées que publiques sont impliquées et elles coopèrent dans les programmes de surveillance non seulement aux USA (Venette et al.2000) mais aussi en Espagne (Gonzalez-Nunez et al.2000).

Il est évident que la mise en œuvre d'une stratégie IRM nécessite un certain niveau d'infrastructures de production qui doit être en place et surtout des systèmes pour la sensibilisation et l'éducation des producteurs sur les concepts IRM et les moyens de guider le comportement des producteurs pour suivre les pratiques IRM nécessaires conformément aux stratégies IRM. Ceci est faisable dans un pays industrialisé mais est souvent difficile à mettre en œuvre dans un pays en voie de développement qui manque d'infrastructures et d'outils de communication. Compensant ce désavantage, les pays en voie de développement ont une distribution spatiale des plantes cultivées qui comporte des très petits champs, avec une mosaïque ou un patchwork de différentes plantes cultivées qui rivalise avec un système de refuge où les plantes cultivées sensibles et résistantes sont mélangées. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour quantifier la solidité de ce système qui doit être étudiée sur une base du cas par cas pour chaque combinaison insecte nuisible/plante cultivée. D'autres considérations importantes sont l'échelle des plantations de maïs Bt et la présence d'autres plantes, comme le coton Bt, qui sont toutes les deux des plantes cultivées pouvant être attaquées par les mêmes nuisibles clés. Par exemple tant les USA que la Chine ont de très grandes superficies de maïs et de coton, avec des fermes de maïs aux USA dans des grands blocs par rapport avec les petites fermes en Chine où la moyenne des fermes de maïs est de un quart d'hectare dans un système agricole fortement dispersé. Comme de plus en plus de plantes cultivées Bt sont déployées, l'interaction entre les plantes cultivées Bt et leurs nuisibles polyphages sera un paramètre de plus en plus important ; ceci est déjà abordé aux USA avec l'obligation pour des refuges plus grands dans les zones où le coton est cultivé et vice-versa.

L'efficacité des stratégies IRM sera considérablement renforcée avec l'augmentation de

la disponibilité de divers gènes avec des modes d'action différents et fournira des outils précieux pour la gestion de résistances. Ces différents gènes seront déployés par les développeurs de technologie dans différentes variétés et plus d'un gène peut être empilé dans une variété par les développeurs de technologie pour augmenter la diversité des modes d'actions dans une variété qui à son tour va contribuer à la durabilité de la résistance. Le but ultime d'un IRM est de permettre aux gènes de résistance d'être déployés de façon optimale de la manière la plus efficace et responsable. Ainsi, l'événement *cry3Bb1*, lancé aux USA en 2003, dans des variétés de maïs Bt améliorées par un développeur de technologie est prévu pour être complémentaire au déploiement du produit double gènes *cry34Ab1/cry35Ab1* dans d'autres variétés par un autre développeur de technologie en 2005. La diversité que ces gènes Bt offrent dans les mécanismes de résistance est en cours de diversification avec les gènes *vip* (*cry34Ab1* et *vip3A*) et sans aucun doute, il y aura d'autres nouveaux gènes découverts qui contrôleront les importants nuisibles du maïs mais avec des modes d'action de résistance complètement différents.

Bien que la mise en œuvre des stratégies IRM offre des avantages importants, ces derniers peuvent aussi être amoindris si ils ne font pas partie intégrante d'un programme de gestion ou si d'autres développements excluent la mise en œuvre adéquate d'un IRM. C'est le cas pour les plantations illégales de plantes cultivées Bt, ce qui se produit dans plusieurs pays en voie de développement. Le fait que la présence de plantes cultivées ne soit pas reconnue par les gouvernements signifie que, de facto, ils ne peuvent pas bénéficier de la mise en œuvre d'un programme IRM nécessaire comme d'une politique nationale. Ainsi, les programmes nationaux qui laissent faire la plantation illégale de plantes cultivées Bt font courir non seulement à leurs propres plantes cultivées le risque que les nuisibles s'adaptent, mais créent aussi un risque international pour tous les pays qui bénéficient actuellement des plantes Bt, y compris ceux qui ont une stratégie IRM gérée avec responsabilité. Le défi est, pour la communauté agricole internationale, de développer,

éduquer et mettre en œuvre un protocole international d'IRM pratique, flexible qui, avec un peu de chance, peut empêcher quelques-uns de mettre en péril les importants bénéfices à long terme que le maïs Bt, correctement géré avec des IRM, offre à la société mondiale.

D'un point de vue mondial, le défi est de savoir comment gérer l'expansion et le déploiement du maïs Bt d'une manière efficace et responsable de sorte que plus de pays puissent bénéficier des importants avantages que le maïs Bt offre, sans faire courir des risques excessifs. L'expérience passée en coordination avec les activités internationales en agriculture, comme la quarantaine, présentent des difficultés et la bureaucratie considérable qui empêcheront souvent la mise en œuvre d'une stratégie efficace. Ainsi, il faut être prudent en considérant les plans ambitieux qui ne sont pas pragmatiques et pratiques. Néanmoins, il est maintenant temps de commencer à penser aux besoins du futur en termes de gestion internationale de l'adaptation des insectes aux protéines Bt chez le maïs, une plante cultivée qui occupe 140 millions d'hectares dans environ 75 pays. Les considérations qui permettent de gérer une stratégie IRM globale au niveau international sont complexes. Bien que similaire à la mise en œuvre des stratégies IRM au niveau national, les stratégies mondiales pour une gestion responsable et l'optimisation de la durabilité de la résistance doivent être extrêmement adaptables afin de répondre aux besoins spatiaux et temporels des différentes variétés GM qui comportent différentes sources de résistance, pour un ensemble de nuisibles différents, dans conditions agronomiques et climatiques variées. Bien que la globalisation présente de tels défis IRM, elle offre aussi de nouvelles opportunités pour plus de pays, particulièrement pour les pays en voie de développement, qui accéderont aux nouvelles plantes cultivées dérivées de la biotechnologie, comme le maïs Bt, offrant d'importants bénéfices agronomiques, économiques, sociaux, environnementaux et pour la santé comme des niveaux plus faibles de mycotoxines.

14. Aspects de sécurité de l'alimentation humaine et animale avec du maïs Bt

Afin de fournir au lecteur un cadre concernant le processus de sécurité alimentaire utilisé pour évaluer la sécurité de l'alimentation humaine et animale des protéines *cry* utilisées chez le maïs Bt, les fondements et les procédures sont énumérées ci-dessous.

14.1 Vue d'ensemble et cadre de l'évaluation de la sécurité de l'alimentation humaine et animale

- «La stratégie pour évaluer la sécurité des protéines Bt *cry* est bien établie et elle est basée sur les lignes directrices internationales »
- Les maïs Bt déployés ont été rigoureusement évalués pour la sécurité de l'alimentation humaine, animale ainsi que la sécurité environnementale.
- Les protéines *Cry* introduites dans le maïs Bt autorisé pour l'alimentation humaine ont une histoire d'utilisation sûre.

Informations générales

- L'évaluation de la sécurité de l'alimentation humaine et animale dérivée du maïs Bt est un processus multidisciplinaire
- Les procédures sont basées sur des standards internationalement acceptés.
- Le processus d'évaluation de la sécurité inclu:
 - Evaluation du trait
 - Evaluation du gène impliqué
 - Evaluation des effets potentiels attendus et inattendus des nouveaux génotypes vis-à-vis de la santé publique
 - Analyse de la protéine
 - < toxicité potentielle

- < allergénicité
- Comparaison du maïs Bt en tant qu'aliment pour les hommes, aliment pour les animaux ou parties transformées avec les plantes traditionnellement améliorées suivant le protocole « d'équivalence substantielle »
 - Etudes de composition – nutriments, minéraux, etc...
 - Etudes de nourrissage animal
- Le maïs Bt a été déterminé comme étant substantiellement équivalent à sa contrepartie avant son déploiement.

Evaluation de la sécurité pour les protéines Cry introduites dans le maïs Bt

- L'évaluation de la sécurité des protéines *cry* introduites dans les maïs Bt suit une procédure différente en comparaison avec les évaluations de sécurité des chimiques xénobiotiques (pesticides)
 - Les chimiques xénobiotiques sont habituellement de petits composés avec des poids moléculaires de 200-600
 - Les protéines *cry* sont de grosses macromolécules typiquement composées de 100-300 amino-acides avec un poids moléculaire supérieur à 11'000.
- En comparaison avec les chimiques xénobiotiques, les protéines *cry* ont une exposition systémique réduite parce qu'elles sont rapidement dégradées dans les intestins

Evaluation de la sécurité de la protéine

- Les protéines *cry* introduites dans le maïs Bt ont été comparées aux protéines endogènes et alimentaires sûres via des :
 - Etudes de digestibilité
 - < Les protéines alimentaires sûres doivent être digestibles afin de fournir une source d'amino-acides,

d'où un contrôle de sécurité qui devait évaluer le potentiel de digestibilité des protéines *cry in vitro* en utilisant des fluides gastriques et intestinaux **synthétiques**.

- Comparaisons de séquences
 - < Les protéines *cry* ont été séquencées pour identifier les relations structurelles et fonctionnelles entre la protéine *cry* et les allergènes ou toxines potentiels. Le séquençage peut aussi établir le degré de parenté entre les protéines *cry* et les protéines déjà présentes dans l'alimentation humaine et animale qui ont une longue histoire d'utilisation et de consommation sûres.

Evaluation de la sécurité

- Les connaissances du mode d'action des protéines *cry* était une condition préalable pour élaborer une évaluation appropriée de la sécurité:
 - Le mode d'action des protéines de contrôle des insectes par le maïs Bt a été bien établi (Betz et al.2000),
 - Les protéines *cry* du maïs Bt ont été soumises à une évaluation des risques graves pour confirmer **eur** sécurité malgré le fait qu'elles sont utilisées avec sécurité depuis longtemps (Betz et al.2000),
 - Des doses critiques sont administrées par gavage aux rongeurs,
 - Les doses de protéine *cry* administrées aux rongeurs étaient au moins 1'000 fois plus fortes que n'importe quelle exposition potentielle de la diète humaine,
 - Aucun effet nocif n'a été observé chez les animaux auxquels on avait administré la protéine *cry* (Betz et al.2000).

- Les protéines *cry* sont considérées comme n'ayant pas d'activité mutagène, tératogène ou carcinogène (FAO/WHO 2000)

Etudes de sécurité alimentaires pour le maïs Bt

- Reconnaissant qu'il a été démontré que le maïs Bt était substantiellement équivalent à ses contreparties conventionnelles et que la sécurité de la (les) protéine(s) introduite(s) a été établie, dès lors aucun test ultérieur n'était nécessaire (FAO/WHO 2000; OECD 2000).
- Lorsque c'est approprié, des études d'alimentation animale correctement élaborées peuvent aider à résoudre les questions relatives aux effets potentiels inattendus et confirment l'équivalence substantielle.

Résumé

- L'évaluation de la sécurité des aliments pour les hommes et les animaux dérivés du maïs Bt est un processus multi-disciplinaire.
- Les protéines *cry* introduites dans le maïs Bt ont été comparées aux protéines endogènes et sûres de la diète qui sont utilisées comme point de référence.
- Les connaissances du mode d'action des protéines *cry* était une condition préalable pour élaborer une évaluation de la sécurité.
- Il a été démontré que le maïs Bt était substantiellement équivalent à sa contrepartie conventionnelle. De même, il a été établi que la protéine *cry* était sûre et ceci a satisfait toutes les nécessités réglementaires (FAO/WHO 2000; OECD 2000).

cultivées est strictement réglementée et tous les produits GM doivent au moins répondre aux standards qui s'appliquent aux plantes cultivées conventionnelles. En pratique, les plantes cultivées GM vont au-delà des standards pour les plantes conventionnelles. Les agences gouvernementales des différents pays sont légalement habilitées pour assurer la sécurité de l'alimentation humaine et animale, pas seulement pour les plantes cultivées GM, mais de toutes les plantes cultivées et appliquent les principes et les stratégies communs. En plus de la surveillance du niveau de protéines Bt et la stabilité des gènes Bt et les autres éléments introduits dans l'événement, la toxicité alimentaire pour les hommes et les animaux des nouvelles protéines est vérifiée ainsi que l'allergénicité et le degré de l'exposition potentielle de l'homme, par exemple via la consommation de grain de maïs Bt. Parce que chaque événement est différent, les évaluations sont faites au cas par cas. Des données sont collectées sur la consommation potentielle, y compris l'effet de la cuisson et la transformation des protéines *cry*. Les connaissances antérieures de la relation existant entre les protéines Bt spécifiques et d'autres toxines connues sont toujours prises en compte mais ce n'est pas un substitut pour les tests d'alimentation animale sur des animaux différents allant du rat au poulet. Ceci est fait dans le but d'identifier l'effet potentiel à court-terme des expositions à fortes doses et d'évaluer l'exposition chronique à long-terme qui voudrait, par exemple, détecter tout effet potentiel carcinogène.

14.2 Évaluations des implications potentielles pour la santé

La préoccupation générale concernant les potentielles questions de santé relatives aux plantes cultivées GM (qui s'applique au maïs Bt) est qu'il pourrait y avoir des effets inattendus associés avec les effets potentiels épistatiques et pléiotropiques en lien avec l'insertion alléatoire du gène (Carpenter et al.2002). Les questions de santé humaine peuvent être classées de façon pratique en quatre catégories :

La sécurité des aliments dérivés de toutes les plantes

- l'ADN introduit a des propriétés pathogènes,
- le produit GM a des propriétés toxiques ou allergiques,
- les changements dans les nutriments et/ou les anti-nutriments,
- le développement de résistances aux antibiotiques contenues dans les gènes marqueurs.

Que la protéine soit un pesticide ou non, comme c'est le cas avec la protéine *CryIAb*, les propriétés pathogéniques de l'ADN introduit sont étudiées directement en examinant l'expression du gène et la stabilité de son hérédité, et indirectement par des tests de toxicité ou d'allergénicité.

Deux types de tests de toxicité sont utilisés. Le premier est le test LD₅₀ pour lequel il y a une exposition unique ou à court-terme – LD₅₀ est la dose létale à laquelle 50 % des animaux testés meurent. Le second est le test NOEL (Niveau d'Effet Non-Observable), dans ce cas les doses sont multiples pendant une période de temps donnée. Les résultats de l'USEPA (table 45) pour le test NOEL pour le *CryIAb* des événements MON 810, Bt 11 et Bt 176 montrent que le test NOEL est sûr à un niveau de 3'250 mg/kg, la digestion rapide en moins de deux minutes et l'absence d'homologie avec des allergènes alimentaires connus.

De plus, pour évaluer la sécurité de la protéine *CryI*, les autres éléments utilisés dans les événements, par exemple, le promoteur CaMV 35S ont aussi été examinés en relation avec la sécurité et il a été déterminé qu'aucun problème de sécurité ne se posait.

Le maïs Bt est intrinsèquement différent d'un maïs tolérant aux herbicides car une nouvelle protéine végétale, Bt, est produite. Cependant, ces protéines Bt ont eu une histoire sûre durant les quarante années pendant lesquelles elles ont été utilisées comme bio-pesticide. En 1998, toutes les données

sur le Bt ont été examinées par l'USEPA qui a conclu que « les données soutiennent massivement la sécurité de la protéine Bt pour les humains et les organismes non-cibles ». C'est pourquoi l'USEPA a ré-enregistré toutes les formules de Bt et a renoncé à l'obligation de soumettre des données supplémentaires sur la sécurité des aliments pour les hommes (Carpenter et al.2002). Beaucoup d'études ont confirmé que les protéines Bt sont seulement toxiques pour les insectes nuisibles sélectionnés. Les données de la table 45 confirment que même quand de très fortes doses sont données dans l'alimentation des rats, aucun effet toxique n'est détectable. Un autre critère qui augmenterait la probabilité de risque est le très fort niveau de protéines Bt dans les tissus de maïs. Cependant, les données de la table 46 confirment que les niveaux de la protéine Bt sont extrêmement faibles variant de 0,005 microgrammes par gramme de tissus végétal à 8 microgrammes par gramme. Du maïs Bt, provenant de tous les événements Bt autorisés, a été donné à manger à du bétail en tant que part de leur diète sans qu'un effet ne soit rapporté. La pléthore d'études sur la sécurité de l'alimentation humaine et animale concernant la protéine Bt représente un satisfecit pour les produits et il n'y a aucune indication qui montrerait des produits secondaires toxiques auraient été générés comme le résultat des effets pléiotropiques.

Les connaissances actuelles indiquent que les protéines *cry* sont toxiques uniquement lorsqu'elles se lient sur les cellules de l'intestin des insectes sélectionnés, sites qui n'existent pas chez les mammifères. Ceci est cohérent avec l'absence de rapport de la toxicité des gènes *cry* chez les mammifères. Cette découverte est étayée par le fait que les protéines *cry* sont rapidement digérées, ce qui n'est pas le cas pour les protéines allergéniques ou toxiques.

Allergénicité

Environ 2 à 3 % de la population souffre d'allergies alimentaires et virtuellement, tous les allergènes alimentaires sont des protéines. Les arachides, les sojas, le blé et les fruits à coque représentent la

majorité des allergies liées aux plantes cultivées. Les conditions allergisantes deviennent évidentes lorsque le système immunitaire réagit de façon anormale à une protéine allergisante dans l'alimentation. Les symptômes comprennent des démangeaisons, des nausées, des urticaires et des spasmes asthmatiques.

Les organismes de surveillance ont suivi les critères de la FAO et du WHO des Nations-Unies pour évaluer les nouvelles protéines et les principales considérations sont :

- Source du matériel génétique et ses relations avec des allergènes connus,
- Similarité entre la séquence ADN de la protéine et des allergènes connus,
- Tests pour la réactivité immunitaire de la protéine si elle est proche d'allergènes connus,
- Digestibilité de la protéine et effet du pH,
- Stabilité de la protéine à la chaleur et à la transformation.

Jusqu'à présent les études d'allergénicité de *Cry1Ab*, *Cry1Fa2* et *Cry3Bb1* ne montrent pas de relation avec des allergènes connus et elles sont rapidement détruites dans le système digestif. Tous les produits de maïs Bt actuellement autorisés ont subi des tests d'allergénicité rigoureux. Les résultats sont normaux et ils indiquent qu'il n'y a pas de raisons de préoccupation. Une étude exhaustive, réalisée par Bernstein et al. (1999) n'a pas trouvé de preuves permettant de conclure que les protéines Bt étaient associées avec une réaction allergique quelconque. Bien qu'il ne soit pas possible d'utiliser du sérum humain pour faire des tests d'allergénicité, les caractéristiques des allergènes sont bien connues : leur taille varie de 10 à 80 Kda, elles sont acides et stables à la chaleur. Les tests réalisés pour tous les événements Bt autorisés ne donnent aucune indication de propriétés allergéniques.

Effet sur la position des nutriments

Les changements des nutriments et des anti-nutriments sont évalués en examinant ces paramètres tant dans le maïs Bt que dans ses équivalents isogéniques. Le principe de l'équivalence substantielle soutenu par le WHO, la FAO et l'OCDE (Kuiper and Kleter 2000) est utilisé pour évaluer les résultats – dans le cas de tous les événements Bt autorisés, il a été démontré que le produit GM était substantiellement équivalent à sa contrepartie non-Bt. Le principe de l'équivalence substantielle « déclare que si un nouvel aliment destiné à l'alimentation humaine ou animale, dérivé de l'amélioration conventionnelle ou du génie génétique, est substantiellement équivalent aux paramètres des standards nutritionnels de sa contrepartie traditionnelle, alors le nouvel aliment peut être considéré comme également sûr » (Carpenter et al.2002).

Potentiel pour le développement de la résistance aux antibiotiques

Dès le tout début, quelques groupes ont spéculé sur le potentiel, pour les gènes marqueurs de résistance aux antibiotiques, de transférer la résistance, premièrement aux bactéries du sol et deuxièmement aux bactéries du système digestif humain. Smalla et al. (2000) ont réalisé une étude détaillée de la littérature. Ils ont conclu que le transfert pourrait ne pas se produire ou si il se produit, cela serait à des fréquences extrêmement faibles dans le sol. Le transfert peut se produire dans le système digestif, mais à de faibles fréquences. Surtout, Smalla et al. (2000) ont mis en avant le fait que la résistance aux antibiotiques est relativement omniprésente et que les plantes cultivées GM y compris le maïs Bt, ne changeront pas sensiblement la fréquence de la résistance aux antibiotiques chez les bactéries. Quoiqu'il en soit, sans préjugés, les développeurs des plantes cultivées GM sont en train d'éliminer progressivement les marqueurs antibiotiques – ceci cessera de fournir aux critiques une diversion pour se concentrer sur la tâche d'évaluer les plantes cultivées Bt comprenant les bénéfices multiples et importants sur la santé environnementale et économique qui peuvent contribuer à une agriculture plus durable.

Table 45. Niveau des Effets Non Observables (NOEL) pour la mortalité après l'exposition de rats à la protéine Bt purifiée toxique

Transgène enregistré	NOEL (mg/kg) (Basé sur le test extrême LD ₅₀)	Digestibilité dans un milieu gastrique artificiel	Homologie avec des allergènes alimentaires connus
MON810 Cry1A(b)	>4000	Rapidement dégradé (<2 minutes dans les fluides gastriques)	Aucune
Bt 11	>4000	Rapidement dégradé (<2 minutes)	Aucune
Bt176 Cry1A(b)	>3280	Rapidement dégradé (<2 minutes)	Aucune

Source: Carpenter et al, 2002, modifié

15. Mycotoxines

Une des principales préoccupations des consommateurs, particulièrement en Europe, est la sécurité des produits alimentaires pour les hommes et les animaux dérivés des plantes cultivées génétiquement modifiées. Actuellement, ces préoccupations ne sont pas étayées par plusieurs études détaillées indépendantes qui ont rapporté que les produits GM sont sûrs. Cela comprend l'Académie Française de Médecine, la Société Royale de Londres, le Conseil Américain des Sciences et de la Santé, les Nations-Unies/FAO, l'Agence des Standards Alimentaires, le Conseil International de la Science, le Réseau Européen d'Evaluation de la Sécurité des cultures vivrières génétiquement modifiées, le Conseil National de la Recherche (USA) et la Commission du Codex Alimentarius - voir références pour les détails des sites Internets. Suite à ces études détaillées rigoureuses, toutes ces organisations internationales ont conclu que les produits pour l'alimentation humaine et animale dérivés des OGM existants sur les marchés remplissaient les standards d'aliments sains et les ont déclarés comme aussi sûrs que les aliments conventionnels. Dans le cas du maïs Bt, qui a été génétiquement modifié pour produire la protéine *Cry1Ab* dérivée de *Bacillus thuringiensis* (Betz et al, 2000), il y a maintenant des preuves claires qui montrent que les produits destinés à

l'alimentation humaine et animale issus du maïs Bt sont souvent plus sûrs que les produits correspondants dérivés du maïs conventionnels car les niveaux des mycotoxines fumonisines sont plus faibles. Cette section est dédiée à la documentation de l'impact de la mycotoxine fumonisine, produite par le *Fusarium verticillioides*, et la possibilité de diminuer le niveau de fumonisine via l'utilisation du maïs Bt. La fumonisine se trouve dans le maïs souffrant de la pourriture fusarienne de l'épi. Les comparaisons du maïs Bt avec les maïs non-Bt correspondants ont montré que, dans quelques environnements où par la pourriture fusarienne de l'épi est un problème chronique, le maïs Bt réduit significativement les concentrations de fumonisines dans l'alimentation humaine et animale. Ceci a des implications importantes sur la valeur de la plante, pour une meilleure efficacité de la production animale et pour la sécurité des aliments pour les animaux.

Les champignons colonisent fréquemment les grains de céréales, arachides, les fruits à coque et quelques autres produits de base tant dans les champs que lors des stockages. A côté des pertes et des dommages de récolte, qui peuvent être importants, certaines espèces contaminent la plante avec des métabolites secondaires, appelés mycotoxines. Il y a cinq mycotoxines agronomiquement importantes :

Table 46. Concentration de protéine (en micro-grammes par gramme de tissus humide de plante) dans différents tissus du maïs à la maturité de la plante et estimation des quantités (en grammes de protéines par acre de maïs)

Transgène enregistré	Plante entière	Feuille	Racines	Pollen	Grain	Grammes de protéine Bt par hectare
Micro-grammes de transgène par gramme de tissus végétal (µg)						
Cry1A(b) MON810 (Yieldgard®)	3,65-4,65	7,93-10,34	ND	0,09	0,19-0,39	464
Cry1A(b) Bt 11 (Yieldguard®) Cry1A(b)	ND	3,3	ND	0,09	8,2	639 g
Bt176	0,6	4,4	<0,008	7,1	<0,005	59

Source: Carpenter et al, 2002, modifié

- La fumonisine : la plus répandue et intensivement étudiée est la Fumonisine B1, produite principalement par le *Fusarium verticillioides* et quelques espèces apparentées (que l'on trouve chez le maïs),
- Le déoxynivalénol produit par le *Fusarium graminearum* (trouvé dans le maïs et les petits grains),
- La zéaralénone produite par *Fusarium graminearum* (trouvée dans le maïs et les petits grains),
- L'aflatoxine, produite principalement par *Aspergillus flavus* (trouvé dans le maïs et les fruits à coques),
- L'ochratoxine A, produite par *Penicillium verucosum* et plusieurs espèces d'*Aspergillus* (trouvées dans le maïs, les petits grains, les raisins, le café et d'autres produits base (Miller 2000; IARC Monograph 82)).

Le grain est attentivement surveillé dans les pays industriels pour trouver une contamination avec les mycotoxines mais ce n'est pas le cas des pays en voie de développement, qui manquent de ressources

et d'infrastructures. En général, les pays en voie de développement ont des climats plus chauds et plus humides qui sont les plus propices à l'accumulation des mycotoxines. Des conditions de stockage inadéquates aggravent le problème. C'est pourquoi, la gravité des problèmes associés aux mycotoxines du maïs est susceptible d'être **beaucoup** plus sérieuse dans les pays en voie de développement, particulièrement dans les zones où le maïs est utilisé directement comme aliment par une proportion importante de la population, comme l'Afrique sub-Saharienne et des parties de l'Asie et de l'Amérique Centrale.

Le Conseil pour les Sciences et les Technologies Agricoles (CAST) aux USA a récemment publié un rapport sur les pertes estimées dues aux mycotoxines aux USA à environ 1 milliard de \$ annuellement (CAST 2003). Les pertes sont dues à des facteurs variés y compris l'incapacité des grains contaminés à remplir les standards de l'alimentation humaine et animale. Le rejet des grains de l'alimentation humaine conduit à une diminution des prix quand ils sont utilisés pour l'alimentation animale et le rejet comme aliment pour les animaux conduit à une perte économique majeure ou totale. Dans les pays en voie de développement, qui ont la capacité d'exporter des

aliments pour les humains, le problème est plus sérieux car il n'existe pas de programmes de soutien pour aider les fermiers à mettre en place des mesures de précautions permettant de contrôler les mycotoxines et ceci peut conduire à des pertes d'exportation et qui à leur tour induisent une perte pour l'industrie et une augmentation de la pauvreté (Otsuki et al. 2001; Bhat & Miller 1991). Dans les pays industrialisés, il est généralement admis qu'il n'y a peu ou pas d'augmentation de la morbidité ou de la mortalité due aux mycotoxines à cause de la surveillance et de l'application des réglementations de la sécurité alimentaire. Une étude de l'impact des aflatoxines dans trois pays asiatiques a trouvé que la majorité des pertes économiques étaient due à l'impact des aflatoxines sur la santé humaine (Lubulwa and Davis 1994).

Chez le maïs, l'accumulation de plusieurs mycotoxines, comprenant le déoxynivalenol, la zéaralénone, la fumonisine et l'aflatoxine, est en relation avec le niveau d'infestation par les insectes (Miller 1995). Avec l'utilisation répandue du maïs Bt, principalement aux USA, au Canada, en Argentine, en Afrique du Sud et en Espagne, on a observé que les concentrations de ces toxines peuvent être plus faibles dans les génotypes Bt que dans les isolignées non-transgéniques ou dans d'autres hybrides commerciaux. Les mycotoxines sont fréquentes dans le maïs à travers le monde (IARC Monograph 56, 82; JECFA 2001) et la FAO estime qu'en moyenne, un quart de tous les grains dans le monde, soit 150 millions de tonnes, est contaminé avec des mycotoxines (Shephard et al. 1996).

Le cinquante-sixième rapport du comité d'experts conjoint FAO-WHO sur les additifs alimentaires a développé un **seuil** maximum provisoire de l'apport journalier tolérable (PMTDI) pour une série de mycotoxines y compris la fumonisine (JECFA 2001). La question d'un PMTDI pour la fumonisine a été acceptée indépendamment par l'Administration américaine des aliments et des drogues (US FDA) (CFSA 2001) et le Comité Scientifique pour les Aliments de l'Union Européenne (SCF 2003). Il existe un accord international selon lequel les

améliorations de la santé de la population se produiront dans la mesure où les concentrations de fumonisine présentes dans les aliments destinés à la consommation humaine seront gérées de manière à ce que le PMTDI ne soit pas dépassé.

Carpenter et al. (2002) notent que si les mycotoxines étaient des pesticides, elles seraient classées dans la catégorie dangereuse d'un point de vue toxicité. Les sérieuses affections de la santé causées par les fumonisines pour différentes espèces animales et les preuves indirectes reliant la fumonisine avec des affections médicales chez les humains est documenté dans la table 47 (Hammond et al. 2003). Les fumonisines sont toxiques pour le foie chez les lapins et les chevaux, des neurotoxicités, des cardio-toxicités, des toxicités du foie et des reins. Les ruminants (moutons et bétail) souffrent de toxicité du foie et des reins en relation avec les fumonisines alors que les porcs montrent des oedèmes pulmonaires, des cardio-toxicités et des toxicités du foie. La toxicité du foie a été rapportée chez les volailles. Plusieurs études d'alimentation animale chez les rongeurs montrent une toxicité pour le foie et les reins. Des études chroniques montrent des cancers du foie et des reins chez les rongeurs. Des dommages du tube neural ont été trouvés chez les souris à qui on avait administré de la fumonisine. Chez les primates, une toxicité sur le système cardiaque et sur le foie a été montrée ainsi que des effets athérogènes. La fumonisine B1 chez le maïs produite par *Fusarium verticillioides et al.* a été classifiée comme un carcinogène B2 (carcinogène possible pour l'homme) par l'Agence Internationale pour la Recherche sur le Cancer (IARC Monographs 56 and 82).

L'évaluation de l'exposition humaine reste très difficile pour la fumonisine B1 ce qui entrave les études épidémiologiques. Plusieurs études suggèrent que la consommation de maïs dans des zones endémiques est associée avec le cancer de l'œsophage et les défauts du tube neural à la naissance (IARC monograph 56; Marasas et al. 2003). Les populations à risque se trouvent dans le sud de l'Afrique (Marasas 1996), la région de Linxian en Chine (Li et al. 1980) et dans le nord-est

de l'Italie (Franceschi et al.1995).

La consommation de maïs, pour l'alimentation humaine, varie d'environ 20 g par jour dans des pays comme les USA ou la France à 200 g/jour dans les pays comme la Colombie, et à 400g/jour dans des pays comme le Kenya où le maïs est un aliment de base. Il est évident que plus la consommation de grains contaminés est forte, plus le risque de dépasser le niveau maximum de toxine est fort. De même, plus le grain est contaminé, plus la probabilité de dépasser le niveau maximum est forte. L'ingestion de fumonisines, par un adulte, consommant 19 g, 200 g et 400g par jour de grains de maïs contaminé à 1 ppm, 5 ppm, 10ppm et 20 ppm de fumonisines a été calculé dans la table 69 (Hammond et al., 2003) à partir d'évaluations précédentes (Gelderblom, données non publiées) avec pour intention d'estimer l'impact sur le PMTDI. Le niveau conseillé pour la fumonisine est de 2 µg par kg et par jour (JECFA 2001). Dans la table 48 une personne au Kenya mangeant la dose normale de 400 grammes par jour contenant seulement 1 ppm de fumonisine excède le PMTDI de trois fois, alors qu'un colombien consommant 200 g par jour atteint le PMTDI permis et un américain consommant seulement 19 g par jour atteint seulement 0,1 du PMTDI. Etant donné qu'il n'est pas inhabituel que des grains de maïs aient contamination de 1 ppm (Hammond et al., 2003), il existe des risques pour les personnes qui consomment des grandes quantités de maïs contaminé. Une manière de réduire le risque pour les personnes qui **consomment** des grains contaminés est de prendre les mesures nécessaires pour réduire le niveau de contamination du grain.

L'insecte nuisible du maïs, la pyrale, contre laquelle le maïs Bt confère une résistance, **favorise** la dispersion des spores de *Fusarium* à partir des feuilles qu'il mange, vers les épis. Les dommages aux épis de maïs faits par la pyrale fournissent des points d'entrée supplémentaires pour le *Fusarium* qui colonise les tissus de maïs endommagés dans lesquels le *Fusarium* produit la fumonisine (Dowd 1998). Les espèces de *Fusarium* impliquées incluent *Fusarium verticilloides* et *F. proliferatum* produisent

de la fumonisine dans le grain. Le maïs mangé par la pyrale et les dommages causés par ce dernier fournissent des points d'entrée faciles pour la colonisation par le *Fusarium*. Ainsi la réduction des dommages dus à la pyrale, par le déploiement du maïs Bt, conduit à une diminution des niveaux d'infection par le *Fusarium* ce qui, à son tour, conduit à une réduction des niveaux de mycotoxines dans les grains de maïs (Munkvold and Desjardins 1997, Sobek and Munkvold 1999). Le déploiement du maïs Bt durant les sept dernières années dans sept pays a entraîné un contrôle efficace de la pyrale et de la pyrale d'Europe (*Diatraea grandiosella*) aux USA, la pyrale et la sésamie en Espagne, le foreur de tige africain et le foreur ponctué des graminées en Afrique du Sud, le Lépidoptère Pyralide et la pyrale de la canne à sucre en Argentine, la pyrale asiatique aux Philippines. La protéine *CryIAb* produite dans le maïs Bt fourni une protection pendant la saison pour les foreurs et ceci a entraîné une diminution significative des niveaux de mycotoxines dans les grains de maïs. Les preuves générées par les scientifiques travaillant dans différents pays à travers le monde confirment les premières découvertes des chercheurs pionniers (Munkvold et al.1999) montrant que le maïs Bt a des niveaux de mycotoxines plus bas que le maïs conventionnel. La réduction des niveaux de fumonisine a des implications importantes pour les animaux qui mangent du maïs et pour les humains qui consomment des aliments comme la polenta en Italie du nord, et dans tous les autres pays dont les aliments de base sont dérivés du maïs comme les pays d'Afrique Sub-Saharienne et d'Amérique Centrale.

Une option pour diminuer les niveaux de fumonisine chez le maïs est de pulvériser des insecticides pour contrôler les insectes nuisibles qui diffusent le *Fusarium* dans le champ mais cela a des impacts négatifs sur l'environnement et expose les fermiers aux insecticides (Dowd et al.1998, Dowd 2001). Une seconde option est d'utiliser le maïs Bt qui n'a aucun des désavantages associés avec les insecticides. De plus, à cause, de son mode d'action dans le contrôle des chenilles foreuses et des fusarioses de l'épi, le maïs Bt pourrait se montrer

plus efficace dans la réduction des concentrations de fumonisines dans la plante dans des conditions où la pourriture fusarienne de l'épi est répandue.

En se basant sur l'intérêt prononcé des européens pour la sécurité alimentaire, on a donné une forte priorité à la question du maïs contaminé avec des mycotoxines, ce qui s'est traduit par la publication de nombreux articles scientifiques sur le sujet (Bakan et al. 2002, Carpenter et al. 2002, Pietri and Piva 2000, Castella et al. 1999, Scudamore and Patel 2000, Visconti and Doko 1994). Les résultats des investigations réalisées en Italie par Pietri and Piva (2000) et présentées dans la table 49 confirment la diminution significative de l'ergostérol dans le maïs Bt (une mesure quantitative du taux de *Fusarium* présent) et la diminution des niveaux de fumonisine, par comparaison avec les maïs conventionnels. Des expériences ont été réalisées sur une période de 3 ans, 1997 à 1999 afin de tenir compte des variations saisonnières, qui sont importantes. Les niveaux d'ergostérol se situent entre 11,9 en 1999 et 49,3 en 1998 qui a été la pire année pour le *Fusarium*. Les niveaux d'ergostérol étaient régulièrement plus bas dans les maïs Bt, par comparaison avec le maïs conventionnel et en moyenne, il y avait une différence d'un facteur trois en faveur du maïs. Les niveaux d'ergostérol les plus forts enregistrés en 1998 correspondent aux plus forts niveaux de fumonisine, ce qui indique une cohérence des résultats. Cependant, la découverte la plus importante était que le maïs Bt a régulièrement diminué le niveau de fumonisine : en moyenne, il y avait une diminution d'un facteur 6 dans le taux de fumonisine, qui varie de 18'431 à 2'954.

Plus tard, une étude détaillée réalisée en Espagne et en France en 1999 (Bakan et al.2002) a montré que le maïs Bt contrôlait efficacement le *Fusarium*. Les niveaux dans les maïs conventionnels sont plus hauts en Espagne qu'en France avec 9 ppm et 3 ppm respectivement contre environ 0,1 à 0,2 ppm dans les maïs Bt – ainsi, en Espagne, la diminution était proche d'un facteur de 50 au moins. En France, les niveaux de fumonisines dans le maïs conventionnel étaient plus faibles, variant de 0,3 ppm à 3 ppm contre 0 ppm dans le maïs Bt. Ainsi, le résultat

global tant pour l'Espagne que pour la France, était proche de 0 ppm pour tous les maïs Bt contre 0,3 à 9 ppm pour le maïs conventionnel. Comme Carpenter et al. (2002) l'ont noté de manière appropriée, la conclusion la plus importante est que le maïs Bt permet de diminuer le niveau de mycotoxines en dessous du niveau recommandé de 2 ppm alors que le niveau le plus élevé dans le maïs conventionnel en Espagne de 9 ppm est presque cinq fois plus élevé que le niveau recommandé.

Une analyse de la littérature montre que dans toutes les études, conçues pour comparer les quantités de mycotoxines dans les maïs Bt et non-Bt, leur niveau a diminué de manière significative (Bakan et al.2002, Dowd 2000, 2001, Munkvold et al.1999, Hammond et al.2002; Hammond et al.2003, Hammond et al.2004). D'un autre côté, il y a de plus en plus de preuves montrant que les niveaux de mycotoxines peuvent souvent être bien au-dessus des niveaux recommandés de 2 ppm dans le maïs conventionnel. Par exemple, les données de la table 50 montrent que même dans les pays industrialisés, les niveaux de fumonisine peuvent être élevés. En Italie, des niveaux pouvant atteindre 60 ppm ont été enregistrés (Doko and Visconti 1994) ; des niveaux élevés de fumonisine à 26 ppm ont aussi été enregistrés en Chine (Wang et al.2003) et aux USA (Hammond et al.2003) et de 27 ppm en Argentine (IPCS 2000).

Etant donné la prévalence de la fumonisine dans les grains de maïs conventionnels à travers le monde et la nécessité de garantir que les niveaux seraient en dessous du niveau recommandé de 2 ppm (notez qu'il est de 1 ppm en Suisse), le maïs Bt contenant le gène *cry1Ab* offre un avantage d'une importance cruciale pour les consommateurs préoccupés par la sécurité de l'alimentation.

En ne choisissant pas l'option d'utiliser la protéine *Cry1Ab* pour réduire le niveau de fumonisine, on prend le risque de récolte des grains de maïs présentant une contamination supérieure au niveau recommandé avec les conséquences que cela peut entraîner pour la santé et l'économie. En termes de bénéfices économiques résultant d'une réduction des

Table 47. Effets sur la santé des fumonisines pour diverses espèces

Espèces	Effets sur la santé	Références
Lapins	Toxicité pour le foie, les reins Neuro-toxicité	CFSAN, 2001; Bucci et al.1996
Chevaux	Neuro-toxicité Cardio-toxicité, Toxicité pour le foie et les reins	Marasas et al.1988; Kellerman et al.1990; Ross et al.1993; Wilson et al.1992; Haschek et al.2003 IPCS 2000
Moutons	Toxicité pour le foie et les reins	Edrington et al.1995
Porcs	Œdème pulmonaire Cardio-toxicité Toxicité pour le foie	Colvin & Harrison 1992; Harrison et al.1990; Hascek et al.2001; Kreik et al.1981; Osweiler et al.1992; Ross et al.1990; Constable et al.2000 CFSAN 2001
Bétail	Toxicité pour le foie et les reins	Mathur et al.2001
Volailles	Toxicité pour le foie	IPCS 2000; CFSAN 2001
Rongeurs (rats, souris)	Toxicité pour le foie et les reins Cancer du foie et des reins	Voss et al.2001; Gelderblom et al.1991; Gelderblom et al.1993; Howard et al.2001
Souris	Défauts du tube neural	Gelineau-van Waes et al.2002; Sadler et al.2002
Primates	Cardio-toxicité, Toxicité pour le foie, Effets athérogéniques	Kreik et al.1981; Fincham et al.1992
Humains	Liens avec les cancers de l'œsophage	Cheng et al.1985; Chu and Li 1994; Doko and Visconti 1994; Rheeder et al.1992; Sydenham et al.1990; Marasas 2001; Wang et al.2003
Humains	Liens avec les cancers du foie	Wang et al.2003; Gelderblom et al.2001; Li et al.2001; Lian et al.2003
Humains	Liens avec des défauts du tube neural	Hendricks 1999

Source: Carpenter et al, 2002, modifié.

toxines, une étude récente conduite par Wu (2003) rapporte que l'utilisation du maïs Bt aux USA augmente la valeur pour les producteurs de 32 millions par an. Dans de bonnes conditions pour la pourriture fusarienne de l'épi, la protéine *CryIAb* non seulement confère des bénéfices en terme d'augmentation de production mais elle offre aussi aux consommateurs, tant humains qu'animaux, la garantie d'avoir des grains ne contenant pas ce

composé très toxique. Dans les pays qui ont une production commerciale de maïs et qui subissent chroniquement la pourriture fusarienne de l'épi, l'utilisation du maïs Bt peut permettre d'atteindre le niveau recommandé. Et ceci est très important dans le monde qui est de plus en plus sensibilisé à la question de la sécurité de l'alimentation humaine et animale. Ainsi, un des bénéfices importants de déployer le maïs Bt en Argentine, Afrique du Sud et

Table 48. Impact de la consommation de maïs et du niveau de fumonisine sur le PMTDI

Exemple de pays	Consommation de maïs (g/jour)	Niveau de fumonisine (p.p.m. dans le grain)	PMTDI ¹
Kenya	400	1	3
		5	16
		10	32
		20	64
Colombie	200	1	1
		5	8
		10	16
		20	32
USA	19	1	0,1
		5	0,7
		10	1,4
		20	2,8

Source: Hammond et al., 2003.

¹ PMTDI (maximum provisoire de l'apport journalier toléré) = 2 µg fumonisine/kg/jour.

Espagne où les niveaux de fumonisine sont rapportés comme étant très au-dessus du niveau recommandé de 2 ppm, est la diminution de plusieurs fois du niveau de fumonisine afin de le limiter en dessous du niveau recommandé qui assure la sécurité alimentaire pour les hommes et les animaux des produits du maïs.

16. Questions commerciales concernant les plantes cultivées GM modifiées

Ce n'est pas une analyse approfondie des questions complexes des échanges agricoles et du rôle de l'OMC. Au contraire, le but est de fournir :

- A l'OMC, une vue globale rapide du contexte du procès intenté par les USA et ses partenaires contre l'UE concernant le moratoire sur les plantes GM en Europe, qui a eu un impact direct sur les exportations du maïs Bt américain vers l'Europe,
- Les implications des réglementations européennes nouvelles et plus sévères proposées concernant l'étiquetage et la traçabilité (2001/18/EC); et

- La nécessité critique d'un accord équitable sur les échanges agricoles et les plantes GM durant les sessions de discussions du WTO à Doha à la fin de 2003.

En mai 2003, les USA et ses partenaires, ont initié une action en intentant un procès auprès de l'OMC contre l'UE parce que cette dernière avait autorisé le moratoire de facto sur les plantes GM, en cours depuis 1998, en refusant d'autoriser de nouvelles plantes GM durant les cinq dernières années (Pew 2003). Les échanges agricoles entre les USA et l'UE représentent un grand marché. En 2002, les USA ont exporté pour une valeur de 6,1 milliards de \$ de produits agricoles, principalement des céréales et leurs dérivés vers l'Union Européenne, qui à son tour a exporté pour 7,9 milliards de \$ vers les USA, principalement du vin et des boissons alcoolisées. Les principales exportations des USA vers l'Union Européenne sont le maïs, le soja et le coton, parmi lesquels 40, 81 et 73 % respectivement étaient GM aux USA en 2003 (USDA/NAAS 2003), plus des produits importants comme le gluten de maïs qui représentait 46 % de tous les produits américains exportés vers l'Union Européenne en 2002. Les exportations américaines de gluten vers l'Union

Table 49. Niveaux de fumonisine (i g/kg) et d'ergostérol (mg/kg) dans les grains de maïs en Italie en 1997, 1998 et 1999

	Fumonisine (ig/kg)		Ergostérol (mg/kg)	
	Bt	Non-Bt	Bt	Non-Bt
1997	2'021	19'759	9,8	34,2
1998	5'448	31'632	15,7	49,3
1999	1'394	3'902	3,9	11,9
Moyenne	2'954	18'431	9,8	31,8

Source: Pietri and Piva, 2000.

Européenne sont tombées de 5,5 millions de tonnes en 1995/96 à 4,4 millions de tonnes en 2000/2001 (American Corn Growers Association 2002). Les produits comme le sirop de maïs à haute teneur en fructose sont aussi une part importante des exportations des USA vers l'Union Européenne.

Les préoccupations au sujet des aliments GM pour les hommes et les animaux ont commencé à la fin des années 90 en Europe quand les nouvelles règles d'étiquetages ont été autorisées dans l'Union Européenne ce qui a conduit au moratoire de facto en 1998. Etant donné que les maïs GM et conventionnels ne sont pas séparés aux USA, les exportations de maïs américains vers l'Union Européenne ont diminué brusquement, conduisant à une perte estimée à 300 millions de \$ par an pour les exportations de maïs des USA vers l'Union Européenne. Avant 1998, deux événements de maïs Bt ont été autorisés en Europe Bt 176 et MON 810. En 1998, 1,5 millions de tonnes de maïs pour une valeur de 35 millions de \$ ont été exportés vers l'Espagne et le Portugal et en 2002, ces exportations ont diminué à 30'000 tonnes soit une valeur de 2,7 millions de \$. Pour placer ces exportations dans le contexte, les exportations de maïs des USA vers l'Europe représentaient 4 % des exportations agricoles totales des USA en 1998 et moins de 0,1 % en 2002. Les trois principales destinations des exportations de maïs américains en 2002 étaient l'Asie (44%), l'Amérique du Nord (20%), l'Afrique (14%) et le reste des autres pays 20% (USDA 2003b).

Les facteurs contribuant aux préoccupations européennes concernant les aliments GM comprennent, entre autres, le manque de confiance dans les organismes de surveillance suite à la maladie de la vache folle, à la viande de poulet contaminé en Belgique et plus récemment au phénomène de la fièvre aphteuse. Dans une situation de surplus alimentaire, les Européens ne perçoivent pas les bénéfices importants pour les consommateurs des plantes cultivées GM plus productives et efficaces, et ainsi, ils ne sont pas incités à changer leur approvisionnement alimentaire, bien que le sondage de l'Eurobaromètre montre un déclin dans les préoccupations concernant les aliments GM.

De plus, certains groupes d'intérêts spéciaux qui sont opposés aux biotechnologies sont préoccupés par le fait que la science interfère avec la nature et ils la rejettent sur des bases éthiques. Ainsi, malgré les déclarations de la Commission de l'Union Européenne suite à une évaluation scientifique rigoureuse selon laquelle les aliments GM sont aussi sûrs que les aliments conventionnels, le moratoire en Europe continue. Ceci a conduit beaucoup d'observateurs à conclure que la principale cause de la méfiance vis-à-vis des produits GM est politique plutôt que scientifique. Ainsi, durant la fin des années 90, le débat sur les plantes cultivées GM et l'opposition contre ces dernières a été alimentée avec le soutien des représentants politiques des partis verts au Parlement Européen et dans les parlements de ses Etats membres. Ce support politique en association avec les groupes de protection de l'environnement et des consommateurs

a conduit à une forte opposition aux plantes GM dans des pays comme l’Autriche et le Luxembourg qui ont banni les plantes GM en 1997 suivis par l’Italie, la Grèce et l’Allemagne. Cependant durant la même période, quatre pays de l’Union Européenne (Espagne, Allemagne, France et Portugal) ont commercialisé de petites superficies de maïs Bt. L’Espagne cultive actuellement environ 50’000 hectares de maïs Bt en 2003 soit 10 % de la superficie nationale du maïs. Il convient de noter que deux pays de l’Europe de l’Est qui devraient adhérer à l’Union Européenne en 2004 (Roumanie et Bulgarie) ont déjà commercialisé des plantes GM. La réglementation de l’Union Européenne concernant les plantes GM aura un impact sur les 10 pays d’Europe de l’Est qui vont adhérer en 2003 car les plantes GM, y compris le maïs Bt, figurent parmi les plantes GM commercialisées ou testées en champs sur le territoire de plusieurs de ces nouveaux adhérents. Chacun des dix futurs adhérents participe à des Réseaux de Bio-sécurité financés par l’Union Européenne et est aussi impliqué dans l’initiative de biosécurité de l’UNEP, qui a pour but d’établir un cadre réglementaire pour les plantes GM à court-terme. La Hongrie a autorisé presque 70 essais en champ durant les quatre dernières années, concernant principalement le maïs, y compris le maïs Bt. La Pologne a aussi réalisé des essais de maïs GM ainsi que la Croatie, la Roumanie et l’Ukraine. D’autres futurs adhérents dont la Bulgarie ont commercialisé de petites superficies de maïs et la République tchèque réalise des essais en champs avancés.

En juillet 2003, le Conseil des Ministres de l’Union Européenne a autorisé de nouvelles règles strictes pour étiqueter et tracer les plantes GM qui, si elles sont mises en œuvre, pourraient lever le moratoire, mais les USA et ses partenaires du procès de l’OMC ont conclu que les standards proposés par la nouvelle réglementation de l’Union Européenne ne sont pas réalistes, pas basés sur une évaluation scientifique, et donc, violent la réglementation de l’OMC. Les nouvelles réglementations devraient s’appliquer 90 jours après la publication dans le Journal Officiel de la loi, qui devrait avoir lieu en octobre 2003.

Table 50. Niveaux de mycotoxines Fumonisine, enregistrés dans les grains de maïs conventionnels

	ppm	Référence
Italie	60	Doko and Visconti 1994
USA	27	Hammond et al.2003
Argentine	27	IPCS 2000
Chine	26	Wang et al.2003

Source: Hammond et al., 2003

Contrairement aux réglementations actuelles de l’Union Européenne (9/220/ EC) qui nécessitent un étiquetage des produits GM si le produit contient de l’ADN détectable, la nouvelle loi proposée (2001/ 18/EC) impose un étiquetage de tous les produits dérivés des OGM indépendamment du fait que l’ADN soit ou non présent, et la tolérance pour la présence artificielle est fixée à 0,9 % du matériel GM. En outre, pour la première fois, les exigences sont les mêmes tant pour les produits alimentaires destinés aux humains que pour ceux destinés aux animaux. Cependant, les produits animaux (viande, œufs et lait) provenant de bêtes nourries avec des OGM ne demandent pas d’étiquetage. Contrairement à, et de manière incohérente avec les obligations d’étiquetage pour les aliments GM destinés aux hommes et aux animaux, le fromage, la bière et le vin élaboré à partir d’enzymes dérivées de la biotechnologie ne nécessitent pas d’étiquetage. Les demandes de traçabilité exigent que les aliments GM pour les hommes et les animaux puissent être suivis « de la fourchette à la ferme » et que les enregistrements soient conservés pendant cinq ans. Tous les aliments demandent une documentation confirmant qu’ils ne contiennent pas d’OGM même lorsque ceux-ci ne peuvent pas être détectés. Alors que les réglementations actuelles sont administrées conjointement par les gouvernements des membres et la Commission Européenne, les nouvelles

réglementations seront gérées par la nouvelle Autorité Européenne de Sécurité Alimentaire. Finalement, les produits GM non autorisés pour la libération sous la nouvelle réglementation, mais évalués par le Comité Scientifique ad hoc de l'Union Européenne, peuvent être libérés si ils contiennent moins de 0,5 % de produits GM.

La motivation de la commission de l'Union Européenne pour exiger une nouvelle réglementation plus stricte (2001/18/EC) est que l'étiquetage et la traçabilité sont essentielles pour restaurer la confiance du consommateur dans la surveillance réglementaire de la sécurité alimentaire en Europe. La traçabilité est considérée nécessaire pour faciliter n'importe quel retrait de produits du marché. Tant l'étiquetage et la traçabilité sont perçus par la Commission comme des étapes nécessaires pour mettre en œuvre un processus d'autorisation des plantes GM et pour l'arrêt du moratoire.

Bien que les USA et ses partenaires, qui ont intenté un procès auprès de l'OMC, n'ont pas émis d'objections au sujet du nouvel étiquetage et de la traçabilité lors du procès auprès de l'OMC. Ils ont été critiques vis-à-vis de la nouvelle réglementation proposée pour les raisons suivantes : la nouvelle réglementation va entraîner une rupture dans les échanges internationaux, elle est coûteuse, irréalisable et impossible à mettre en œuvre, et elle crée une discrimination contre les produits GM sans fournir un avantage pour la sécurité alimentaire ou environnementale. Il y a aussi un souci que les consommateurs sensibilisés par les OGM en Europe perçoivent l'étiquetage comme un préavis négatif et que cela conduise à des pertes de marché dans le futur en Europe qui pourraient atteindre 4 milliards par an. Les répercussions de tout développement négatif en Europe, particulièrement en termes d'impact dans les pays en voie de développement pourraient créer une future escalade des préoccupations au niveau international. Une préoccupation particulière est l'impact sur les pays africains qui pourraient choisir de renoncer aux avantages importants que les plantes GM offrent à cause de la perte potentielle d'importants marchés d'exportation en Europe. Les USA ont insisté sur les

questions morales concernant la politique européenne sur les aliments GM qui a un impact sur les politiques des nations africaines, qui ont refusé les aliments GM, malgré la menace d'une famine et la souffrance de millions de personnes. Ainsi, l'adoption de lignes directrices de l'Union Européenne concernant les plantes GM par les pays en voie de développement ne résulterait pas seulement dans le refus d'aliments pour la survie mais en une perturbation du commerce au niveau mondial. Le maïs Bt a joué un rôle central dans toutes les transactions concernant l'aide alimentaire américaine pour l'Afrique et a toutes ses chances de continuer à être la principale plante GM impliquée parce qu'il occupe déjà 10 millions d'hectares dans huit pays et qu'il est susceptible d'être adopté à court-terme par plus de pays, tant industrialisés qu'en voie de développement.

Alors que l'OMC est le principal organisme international qui réglemente les échanges agricoles mondiaux, y compris les échanges des plantes GM, il existe plusieurs autres organisations qui ont des rôles importants en ce qui concerne les plantes GM. La commission du Codex Alimentarius, mise en place par l'OMC et la FAO, est en train de développer des lignes directrices internationales pour l'analyse de la sécurité de l'alimentation humaine et animale avec des implications tant pour l'étiquetage que pour la traçabilité. La Convention sur la Diversité Biologique récemment ratifiée, qui s'appuie sur le Protocole de Bio-sécurité de Carthagène, exigera que, dans les cargaisons transfrontalières d'organismes modifiés vivants (LMO), de nouveaux standards soient remplis ce qui aura un impact important sur le commerce des plantes GM. De plus, l'OCDE, auquel tant l'Union Européenne que les USA adhèrent, est inclus dans des activités visant à harmoniser les questions de commerce en relation avec la biotechnologie.

Durant les deux prochaines années, des discussions intenses et importantes auront lieu au sujet de différents aspects des plantes GM. Elles auront un impact sur le commerce. Le maïs Bt jouera un rôle central dans ces discussions en tant que modèle d'aliment pour les hommes ou les animaux qui le

Table 51. Echanges agricoles entre les USA et l'Union Européenne : 2001

Référence	Milliards de \$
Exportations des USA vers l'Union Européenne	6,1
Exportations de l'Union Européenne vers USA	7,9

Source: Pew 2003

Table 52. Exportations de maïs américain vers différentes régions en 2001, exprimées en pourcentage des exportations totales de maïs

Région du monde	%
Asie	44
Amérique du nord	20
Afrique	14
Autres	22

Source: Pew 2003

Table 53. Exportations américaines de maïs vers l'Union Européenne

Exportations de maïs des USA vers l'Union Européenne	1998	1999	2000	2001	2002	Changement entre 1998 et 2002 (exprimé en %)
Millions de tonnes	1,56	0,32	0,01	0,07	0,03	-98%
Valeurs (millions de \$)	35,3	1,4	8,1	1,8	2,7	-93%
% des exportations américaines totales	4%	1%	0,1%	0,1%	<0,1%	-97%

Source: Pew 2003

potentiel d'apporter des bénéfices importants et multiples à la société, bénéfices environnementaux, économiques, sociaux et pour la santé, y compris la très importante contribution à la sécurité alimentaire tant pour les hommes que pour les animaux. L'incapacité d'atteindre un accord raisonnable sur la question des plantes GM à la session de discussions de l'OMC à Doha revient à refuser aux pays en voie de développement un accès vital à une technologie qui peut contribuer à la réduction de la pauvreté et à une meilleure qualité de la vie pour des millions des personnes pauvres, que la communauté mondiale a promis de soutenir à Johannesbourg en 2002. Les pays en voie de développement n'ont pas été entendus, ou bien servi, par la dernière session de l'OMC en Uruguay. Il serait tragique que leurs besoins urgents ne soient à nouveau pas entendus à Doha, où leurs priorités urgentes et des besoins

alimentaires humanitaires pour les hommes et les animaux doivent être présentés. Une résolution pour un commerce agricole équitable à Doha, devrait s'attaquer tant aux subventions qu'aux plantes GM. Le maïs Bt fournit un excellent exemple des bénéfices importants et multiples que les plantes GM offrent aux pays en voie de développement. Après cinq années de débats, un accord équitable à Doha permettrait au monde d'avancer. Cela permettrait d'exploiter les énormes bénéfices que la biotechnologie offre à la société mondiale, société qui doit apprendre à vivre ensemble harmonieusement dans le village global actuel où les échanges agricoles libres et la liberté de choix pour les pays du sud concernant la biotechnologie végétale sont des conditions sine qua non à une croissance économique globale équitable, ce qui à son tour contribuera à un monde plus sûr.

17. Potentiel mondial du maïs Bt : opportunités et défis

L'histoire est habituellement la meilleure façon de prédire le futur. C'est pourquoi, en essayant d'évaluer le potentiel mondial de la première génération de la technologie du maïs Bt (*cryIAb*), l'information de cette étude détaillée des principaux Lépidoptères nuisibles du maïs, particulièrement la famille des chenilles foreuses et leur contrôle avec Bt, fournit une connaissance historique de base sur laquelle les hypothèses et les futures projections des bénéfices potentiels peuvent se baser. Une évaluation préliminaire de la chrysomèle des racines de maïs sera plus appropriée au moment où la nouvelle génération de produits de gène Bt aura été commercialisée depuis quelques années.

En 2002, le maïs Bt était planté mondialement sur 9,9 millions d'hectares atteignant presque le tournant historique de 10 millions d'hectares, ou 25 millions d'acres, ce qui sera probablement dépassé en 2003. De toutes les plantes GM, le maïs sera, à court-terme, probablement la plante qui offrira le plus d'options en termes de différentes combinaisons de **gestion** des nuisibles et de qualité des gènes pour convenir aux différents environnements au travers du monde dans lesquels le maïs est cultivé et commercialisé.

Il est évident que les principaux Lépidoptères nuisibles, particulièrement ceux de la famille des chenilles foreuses, sont la principale contrainte pour augmenter la productivité et qu'ils ont une importance économique dans la plupart des pays cultivant du maïs dans le monde. Un peu moins de la moitié (46 %) des superficies de maïs dans les 25 pays cultivant du maïs **subisset** une pression des Lépidoptères nuisibles moyenne (40 % des superficies de maïs infestées) à forte (60 % des superficies de maïs infestées) (table 19). La preuve en faveur d'une moyenne d'infestation par les chenilles foreuses de 40 % dans les pays des méga-environnements tempérés est soutenue non-seulement par les données évidentes dans la littérature publiée ou non et par la sévérité des infestations par des Lépidoptères nuisibles du maïs,

mais aussi par le fait que 30 % de la superficie de maïs en Argentine a déjà été occupée par du maïs Bt en 2002 **et** devrait atteindre 40% en 2003. De même, la superficie du maïs Bt aux USA était de 21 % en 2004, 24 % en 2002, et elle a grimpé jusqu'à 29 % en 2003 et devrait continuer à augmenter. Les preuves supportant les niveaux d'infestation élevés de 60% par des Lépidoptères nuisibles dans les méga-environnements tropicaux, comme le Brésil, sont que les niveaux d'infestation confirment que les environnements tropicaux sont plus propices à pour de multiples générations de nuisibles s'imbriquant. Ceci est cohérent avec le fait que 60% des superficies de maïs au Brésil ont déjà été traités avec des insecticides pour contrôler les Lépidoptères nuisibles, le légionnaire d'automne étant le principal nuisible avec les chenilles foreuses qui ne peuvent pas être contrôlé efficacement avec des insecticides.

Il est important de souligner que le tonnage d'insecticide couramment appliqué n'est pas un bon indicateur de l'importance des chenilles foreuses parce que les insecticides ne sont pas très efficaces pour contrôler les foreurs qui se cachent dans la tige où les insecticides ne peuvent pas pénétrer ; d'où le fait que la majorité des fermiers n'utilisent pas d'insecticides bien qu'ils sachent que les pertes dues aux chenilles foreuses sont fortes et que la situation est rendue plus complexe par les variations saisonnières du nuisible. Cependant, le maïs Bt contrairement aux insecticides peut fournir un contrôle efficace et sûr pour un grand éventail de chenilles foreuses et il a le potentiel d'occuper une superficie infiniment plus grande que celle actuellement traitée avec des insecticides pour le contrôle des chenilles foreuses. Par exemple, avant l'introduction du maïs Bt en 1996 aux USA, en moyenne seulement 2 % des 32 millions d'hectares de maïs étaient traités avec des insecticides pour contrôler les chenilles foreuses alors que 24 et 29 % des superficies américaines de maïs étaient cultivées avec du maïs Bt en 2002 et 2003 respectivement (USDA/ NAAS 2003). Ainsi le rapport entre les superficies traitées avec du Bt exprimé dans les plants de maïs contre les insecticides était de 12 fois en 2002 et presque 15 fois en 2003 (2 % par opposition à 29 %). La même comparaison est faite

en Argentine où le maïs Bt occupe 30 % en 2002 et devrait occuper 40 % de la superficie de maïs en 2003. Ceci indique un rapport plus élevé en faveur du maïs Bt parce que le pourcentage des superficies de maïs traitées pour les chenilles foreuses en Argentine est faible en comparaison avec la superficie de maïs Bt. La situation en Afrique du Sud où 20 % de la superficie de maïs en 2002 était déjà occupé par du maïs Bt et devrait continuer à grimper en 2003, est similaire à celle de l'Argentine. En se basant sur les données actuelles, reconnaissant que le dommage des insectes nuisibles sur le maïs va varier et qu'il dépend du niveau d'infestation des nuisibles d'année en année et de région à région, une infestation de 40% de la superficie du maïs par les Lépidoptères nuisibles dans les méga-environnements tempérés et de 60 % dans les environnements tropicaux – subtropicaux est une évaluation appropriée, cohérente avec les données évidentes.

En évaluant le potentiel mondial du maïs Bt, il est utile d'estimer son potentiel à partir de points de vue différents mais complémentaires :

- Superficie mondiale potentielle de maïs sur laquelle le maïs Bt pourrait être adopté à court ou moyen terme,
- Potentiel pour la productivité et les gains de production,
- Substitution et économie d'insecticides,
- Produits alimentaires pour les hommes et les animaux plus sains avec des niveaux plus faibles en mycotoxines,
- Point de vue du fermier.

17.1 Superficie mondiale potentielle pour le maïs à court et moyen terme

Etant donné que la superficie mondiale de maïs de 140 millions d'hectare est également divisée entre

les zones tempérées (50%) et les zones tropicales, sub-tropicales et montagneuses (50%) (table 7), la superficie potentielle pour le maïs Bt sur une base mondiale est de 40% des 70 millions d'hectares du maïs des zones tempérées, soit 28 millions d'hectares, et de 60% des 70 millions d'hectares du maïs des zones tropicales, soit 42 millions d'hectares, pour un total de 70 millions d'hectares.

Cependant comme, à court ou moyen terme, le maïs Bt devrait être adopté, globalement, dans les systèmes de maïs hybrides, les 70 millions d'hectares ont été adaptés à la baisse. En se basant sur une utilisation de 90 % des hybrides dans les régions tempérées, y compris la Chine et l'Argentine, et une utilisation de 43% hybrides dans les zones tropicales, on arrive à une superficie mondiale totale potentielle de maïs Bt de 43 millions d'hectares (table 54), qui est à comparer avec la superficie actuelle de maïs Bt de 10 millions d'hectares qui sont tous des hybrides.

Ainsi, le potentiel pour les méga-environnements tempérés tant dans les pays industrialisés qu'en voie de développement (y compris la Chine) est de 25 millions d'hectares et de 18 millions d'hectares potentiels dans les méga-environnements tropicaux / sub-tropicaux des pays en voie de développement. Il est important de corriger une perception erronée, souvent perpétuée par les critiques des biotechnologies, selon laquelle les pays en voie de développement utilisent seulement des semences conservées par les fermiers ou des OPV. En fait, les semences de type hybrides sont le principal type de semences dans beaucoup de pays en voie de développement et, par conséquent, il y a un canal de distribution établi qui peut aussi servir pour distribuer le maïs Bt. C'est le cas pour la Chine où 84 % des semences sont des hybrides, l'Afrique de l'est et du sud à 81 %. Les régions qui utilisent le moins les variétés hybrides sont le Mexique et l'Amérique centrale (15 %), le nord de l'Afrique (9 %) et l'Afrique de l'ouest et du centre (4 %). Dans ces dernières régions, où les semences améliorées (hybrides et OPV) représentent moins de 50 %, un effort spécial doit être fait par des aides financières et des agences de développement pour développer

pour que le maïs Bt soit diffusé via les OPV et des semences conservées par le fermier par des programmes internationaux de développement qui travailleront en partenariat avec le secteur privé pour faciliter le transfert de plantes GM et se concentreront sur le service des besoins des petits fermiers à faibles ressources.

Alors que la future adoption du maïs Bt est soumise à de nombreuses contraintes y compris les capacités de réglementation, l'acceptabilité de la technologie, les droits de propriétés intellectuelles et les contraintes du commerce qui vont affecter à la fois les pays industrialisés et les pays en voie de développement, les pays en voie de développement doivent faire face à de plus en plus de contraintes comme :

- Les contraintes traditionnelles associées au manque d'infrastructures, de système de réglementation, de finances, de ressources humaines, d'institutions faibles et d'un apport inadéquat de semences de qualité et de systèmes de distribution,
- Cinquante quatre pour cent du maïs est hybride dans les pays en voie de développement comparé avec 94 % dans les pays industrialisés. Jusqu'à présent tous les maïs Bt ont été introduits via le système hybride et il est probable que cela continue dans le court-terme, suivie plus tard par les OPV. Le développement du maïs Bt via les systèmes non-Bt se fera essentiellement via les organisations internationales comme le CIMMYT et les organisations philanthropiques de transfert des biotechnologies comme l'ISAAA et les programmes nationaux travaillant dans des programmes de partenariat avec le secteur privé. Par exemple, le CIMMYT est actif dans un programme de la Fondation Syngenta (IRMA) en collaboration avec le KARI au Kenya, élaboré pour incorporer une résistance aux insectes dans le maïs avec l'utilisation des gènes Bt.

- La faible productivité/hectare est liée à une faible valeur/hectare et va limiter l'adoption du maïs Bt à moins que le coût de la technologie/hectare soit ajusté par les pays en voie de développement.
- Les économies dans les coûts de production sont susceptibles d'être accessoires car peu d'insecticides sont actuellement utilisés pour le contrôle des foreurs.

Compensant les contraintes énumérées ci-dessus auxquelles sont confrontés les pays en voie de développement, les caractéristiques suivantes fournissent les mesures d'encouragement pour ces pays par rapport aux pays industrialisés :

- Les pertes dues aux nuisibles exprimées en pourcentage sont suffisamment élevées dans les pays en voie de développement car les infestations sont plus intenses et les générations des insectes nuisibles se recouvrent partiellement,
- C'est pourquoi, les gains de récolte en faveur du maïs Bt sont significativement plus élevés en prenant pour base le pour cent, malgré le fait que les rendements moyens soient plus faibles dans les pays en voie de développement,
- Les grains ayant incorporé la technologie Bt sont plus appropriés pour les petits fermiers parce qu'ils ne nécessitent pas l'équipement, les connaissances et les informations nécessaires pour utiliser les insecticides et parce que le Bt réduit l'exposition des fermiers aux insecticides. Ceci est particulièrement important pour les petits fermiers qui appliquent les insecticides avec des pulvérisateurs manuels.
- Etant donné que le maïs est utilisé plus souvent comme aliment pour les hommes et que les niveaux de mycotoxines sont significativement plus élevés dans les pays en voie de développement, l'utilisation du

maïs Bt est infiniment plus importante dans les pays en voie de développement.

- Finalement, et surtout, l’augmentation de la productivité aurait un impact direct sur la sécurité de l’alimentation humaine et animale, la sécurité des aliments pour les hommes et les animaux. L’augmentation des revenus consécutive à la plus forte productivité pourrait contribuer à diminuer la pauvreté dans les zones rurales où les besoins sont les plus grands. Les pays en voie de développement devront produire 80 % de l’augmentation de leur demande de maïs qui se chiffrera à 266 millions de tonnes en 2020 – seulement 20 % de l’augmentation des demandes des pays en voie de développement pourra se faire par des importations.

En tenant compte de tout ce qui précède, il est prévu que le maïs Bt ait, dans le court ou moyen terme, le potentiel technologique pour réaliser des bénéfices sur 40 à 45 millions d’hectares en comparaison avec les 10 millions d’hectares qu’il occupe aujourd’hui. La principale contrainte est liée avec le manque de capacité de réglementation, qui est considéré comme la plus importante avec l’acceptabilité, et les questions relatives au commerce, particulièrement en relation avec l’Europe. Le maïs Bt est susceptible de continuer à connaître des taux de croissance élevés à court ou moyen terme dans les marchés traditionnels des USA, du Canada, de l’Argentine, de l’Afrique du Sud, de l’Espagne, des Philippines et du Honduras. Sous réserve d’autorisation légale, l’Asie offre des nouveaux marchés importants en Chine, Inde et Indonésie et le Brésil en Amérique Latine. Les considérations **commerciales** et le manque de capacité de réglementation et une résolution pour autoriser le maïs Bt seront les facteurs principaux qui auront un impact sur l’adoption par des pays comme l’Egypte, le Kenya, et le Nigeria sur le continent africain. Les considérations politiques seront le facteur principal qui gouvernera l’autorisation et l’adoption dans les pays d’Europe de l’est comme la Roumanie et la Hongrie, deux pays candidats à l’adhésion à l’Union

Table 54. Superficie mondiale potentielle pour le maïs Bt (*cry1Ab*)

Région du monde	Superficie potentielle (millions d’ha)	Superficie avec des hybrides (millions d’ha)
Zone Tropicale	42	18
Zone Tempérée	28	25
TOTAL	70	43

Source: Pew 2003

Européenne. En Europe de l’ouest, la France, l’Italie et l’Allemagne ont beaucoup à gagner de la technologie, mais des considérations politiques en relation avec l’acceptabilité ont continué à entraîner le rejet de la technologie sauf en Espagne où le maïs Bt a eu un succès total. En résumé, le maïs Bt technologique a le potentiel de délivrer des bénéfices sur 25 millions d’hectares via un système d’hybrides dans les méga-environnements tempérés, parmi lesquels la Chine offre les plus grandes opportunités. Les contraintes de productivité associées avec la pyrale asiatique en Chine sont importantes et les gains de rendement offerts par le maïs Bt sont substantiels. Les pays tant en Europe de l’est qu’en Europe de l’ouest cultivant du maïs dans des méga-environnements tempérés pourraient aussi bénéficier du maïs Bt et son adoption dans ces pays fournirait le stimulus nécessaire à une acceptabilité large sur une base mondiale. Dans les environnements tropicaux avec un potentiel de 18 millions d’hectares de maïs Bt via le système des hybrides, le Brésil est de loin la plus grande possibilité suivi par le Mexique. Des pays potentiels sur le continent africain comprennent le Nigeria, le Kenya et l’Egypte. Reconnaissant qu’il existe des contraintes importantes à l’adoption du maïs Bt dans les pays en voie de développement, les bénéfices importants et multiples que le maïs Bt offre en terme de bénéfices agronomiques, environnemental, économiques et sur la santé qui contribuent à la diminution de la pauvreté, peuvent collectivement fournir les motivations et les stimulus pour la société

mondiale afin de s'assurer que les pays en voie de développement ne rejettent pas ce que la technologie du maïs Bt peut apporter maintenant plus les améliorations que la technologie de seconde **génération**, qui sera disponible dans les trois prochaines années, offre.

17.2 Possibilités **qu'a le maïs Bt d'augmenter la productivité et la production**

En absence d'un ensemble exhaustif de données provenant d'essais en champs pour mesurer les performances de rendement du maïs Bt par rapport avec le maïs conventionnel dans les pays du Top 25 des producteurs de maïs, les niveaux d'infestation et les estimations correspondantes pour les pertes de rendements des essais en champs et des études détaillées provenant de pays sélectionnés ont été utilisées pour calculer les gains de rendement consécutifs à l'adoption du maïs Bt. Les estimations des pertes de récolte générées par les essais en champs et les études détaillées fournissent des indications au sujet des gains de productivité et les gains actuels sont liés aux niveaux d'infestation des nuisibles spécifiques. Basé sur des gains de récolte provenant d'une série de données d'essais en champs de maïs Bt (table 30) réalisées dans les pays clés producteurs de maïs, un gain moyen de 5 % a été utilisé pour le gain du maïs Bt dans les zones tempérées et 10 % de gain pour les zones tropicales. On considère que ce sont des estimations prudentes des gains de récolte, étant donné que dans beaucoup d'expérimentations en champs des augmentations de 10 % au minimum sont communes dans les zones tempérées et d'au moins 15 % dans les environnements tropicaux. Pour adapter ces valeurs limites en **augmentation** de récolte, des projections pour le maïs Bt sont faites tant pour les zones infestées et les superficies nationales de maïs afin de fournir une fourchette **d'augmentations** de récolte, plutôt qu'une seule estimation ponctuelle. Ainsi, dans le cas des USA, les estimations de gains seraient de l'ordre de 4,6 millions de tonnes, en se basant sur une perte de 5 % sur une zone infestée de 40 % à 11,4 millions de tonnes pour une perte de 5

% sur la superficie totale de maïs, avec les gains actuels susceptibles d'être proche de 11,4 millions de tonnes. L'estimation de 5 % dans les USA est considérée comme prudente et elle est cohérente avec les études détaillées les plus exhaustives des gains de rendement associés au maïs Bt (Marra et al.2002) parmi lesquelles cinq études nationales, réalisées durant la période de quatre ans de 1997 à 2000, qui montraient un gain moyen de 5 % et 23 autres études réalisées dans des Etats sélectionnés montrant une augmentation de rendement moyenne de 8 % sur la même période.

Une étude similaire réalisée par l'industrie a confirmé que 8'866 comparaisons de données provenant d'essais en champ comparant le maïs Bt et les iso-lignées conventionnelles durant la période 1995 à 2002 a aussi abouti à un gain de 423 kg/ hectare soit un gain de 5,2 % sur une période de huit ans. Les données de la table 55 indiquent que, sur une base mondiale, les gains projetés, énumérés dans l'ordre décroissant, liés au déploiement du maïs Bt sur une base mondiale seraient de 15,5 à 34,4 millions de tonnes soit un gain de 3 à 6 %, avec une moyenne de 4,5 %, soit 25 millions de tonnes, évaluées à 2,7 milliards de dollars au prix international de 108 \$ par tonnes (World Bank 2003). Ceci est cohérent avec les estimations de Oerke (2002) qui a conclu que les pertes actuelles dues à tous les insectes nuisibles étaient de 9 % (table 20). Les données de la table 56 indiquent que le déploiement du gène Bt *cry1Ab* entraînerait un gain de 4,5 % par le contrôle de la famille de nuisibles des chenilles foreuses et un contrôle partiel des noctuelles avec les 4,5 % des pertes restantes associées avec tous les autres nuisibles : ceci **inclut** la chrysomèle des racines du maïs aux USA et les autres nuisibles pour lesquelles seul un contrôle partiel peut être obtenu, par ex. les noctuelles, les vers-gris et les vers de l'épi de maïs qui sont omniprésents. La nouvelle génération de Bt et les nouveaux gènes promettent un meilleur contrôle pour les noctuelles et les vers-gris via un contrôle plus large qui apporterait des gains supplémentaires dans les rendements supérieurs au gain de récolte de 4,5 % de la première génération de maïs Bt qui ont incorporé le gène *cry1Ab*.

De manière à faciliter l'identification des pays clés bénéficiaires potentiels pour le maïs Bt, les gains de rendement prévus suite au déploiement du maïs Bt (*cry1Ab*) dans le Top 25 des pays cultivant du maïs de la table 55, ils ont été classés en cinq catégories basées sur le gain maximum potentiel dans la production au niveau national. La catégorie 1 avec des gains de plus de 10 millions de tonnes comprend seulement les USA qui ont déployé 8,4 millions d'hectares en 2002 et produisent environ 40 % du maïs mondial. La catégorie 2 avec des gains prévus de 5 à 10 millions de tonnes comprend seulement la Chine, le second plus grand producteur de maïs dans le monde qui a des essais avancés de maïs Bt en cours dans les champs. La catégorie 3 avec des gains nationaux de 1 à 1,5 millions de tonnes comprend trois grandes économies d'Amérique Latine – le Brésil, l'Argentine et le Mexique – et l'Inde en Asie, parmi lesquels l'Argentine est le seul pays à bénéficier actuellement du maïs Bt. La catégorie 4 (gains de 0,5 à 1 million de tonnes) comprend l'Indonésie, la France, l'Italie, le Nigeria et l'Afrique du Sud. Le dernier pays est actuellement le seul pays de ce groupe à bénéficier du maïs Bt. Les 14 autres pays de la table 55 sont tous dans la catégorie 5 avec des gains nationaux de moins de 0,5 millions de tonnes annuellement. Ainsi, les données de la table 55 confirment que, comme prévu, les gains les plus importants sont obtenus dans les pays qui ont de grandes superficies et une forte production. Le Top cinq des pays qui bénéficieraient le plus du maïs Bt comprend les USA (4,6 à 11,4 millions de tonnes), la Chine (2,5 à 6,2 millions de tonnes), le Brésil (2,1 à 3,6 millions de tonnes), le Mexique (1,1 à 1,9 millions de tonnes) et l'Inde (0,7 à 1,2 millions de tonnes). Les vingt autres pays énumérés dans la table 55 ont tous des gains estimés en dessous de 1 million de tonnes. Le fait que le gain absolu soit en dessous de 1 million de tonnes et la part mondiale est petite pour ces 20 pays ne doivent pas amener à l'idée erronée que les bénéfices potentiels ne sont pas importants pour ces pays et que le maïs Bt ne mériterait pas une adoption. Au contraire, il y a plusieurs pays énumérés dans la table 55, dont l'Afrique du Sud et l'Argentine, dont les gains prévus sont inférieurs à 1 million de tonnes et où les bénéfices du maïs Bt au niveau du fermier

représentent un avantage important. Ceci a déjà donné au fermier des raisons d'augmenter la superficie plantée avec du maïs Bt chaque année depuis qu'il a été adopté, simplement parce que les bénéfices justifient cet investissement. Ainsi, d'un point de vue relatif, le maïs Bt offre des avantages similaires aux grands et petits pays ainsi qu'aux fermiers commerciaux et de subsistance.

Dans une perspective mondiale, les grands gains associés avec le maïs Bt qui seront associés avec la production de maïs dans une région donnée et avec un niveau d'infestation précis. Les données de la table 57 indiquent que les plus grands gains se produiront en Amérique du nord qui produit plus de maïs (227 millions de tonnes) qu'aucune autre région. La production équivaut à presque 40 % de la production mondiale de 600 millions de tonnes. Les USA et le Canada ensemble devraient gagner jusqu'à 11,8 millions de tonnes, évaluées à jusqu'à 1,2 milliards de dollars par an – ce qui représente 34 % du gain mondial total prévu de 34,4 millions de tonnes évaluées à 3,7 milliards de dollars. L'Asie, avec de grands pays comme la Chine, l'Inde et l'Indonésie, ainsi que les Philippines et la Thaïlande, devrait gagner jusqu'à 9,1 millions de tonnes évaluées à 1 milliard de dollars soit 26 % du gain mondial.

Les résultats des essais en champs en Chine avec du maïs Bt sont représentatifs des gains au niveau national, les prévisions de la table 55 sont prudentes. La Chine seule, avec 25 millions d'hectares de maïs et l'utilisation d'hybrides à un taux de 84 % **peut** en œuvre un programme d'adoption rapide du maïs Bt, qui rivaliserait avec l'adoption accélérée du coton Bt en Chine sur plus de 50% des superficies **nationales** par 5 millions de petits fermiers en Chine sur seulement cinq ans.

La superficie de culture de maïs en Chine est cinq fois plus importante que la superficie de coton et, bien que les gains potentiels par hectare soient plus faibles que dans le cas du coton Bt, le gain national lié à l'adoption du maïs Bt sera plus grand à cause de la différence de superficie en faveur du maïs (25 millions d'hectares à comparer avec 5 millions

d'hectares pour le coton). L'Amérique latine devrait gagner 20 % des gains mondiaux, le Brésil étant le principal bénéficiaire suivi par le Mexique qui doit se décider au sujet d'une stratégie appropriée vis-à-vis des plantes GM étant donné qu'il est le centre de diversité du maïs et suite aux récentes allégations concernant l'introgression et les implications possibles pour la biodiversité. Le Mexique est un grand marché à gagner pour les nouvelles technologies et son évaluation des questions et des stratégies proposées concernant le maïs Bt est une décision critique qui va déterminer si le Mexique peut bénéficier des importants bénéfices que les nouvelles technologies offrent.

L'Afrique met en avant huit pays du Top 25 des pays producteurs de maïs dans le monde qui auraient tout à gagner à adopter le maïs Bt. Parmi eux, l'Afrique du Sud qui a déjà déployé avec succès le maïs Bt jaune pour l'alimentation animale et le maïs blanc pour l'alimentation humaine. Plusieurs pays de l'Afrique de l'est et du sud, dont le Kenya, la Tanzanie, l'Éthiopie et le Malawi où 81 % des semences de maïs vendues sont des hybrides, pourraient bénéficier de façon importante du maïs Bt car les pertes dues aux chenilles foreuses au Kenya ont été estimées à 13 %. Le Nigeria a la plus grande superficie de maïs en Afrique (4,2 millions d'hectares) et il est très désireux de bénéficier de ce que la biotechnologie végétale offre. Le Congo en Afrique centrale qui cultive plus d'un million d'hectares en bénéficierait aussi. Le gain total prévu pour l'Afrique est estimé à jusqu'à 2,3 millions de tonnes, évaluées à 200 millions de \$ par an et représentant 7 % de la part mondiale de gain de récolte. L'Europe a quatre pays qui figurent parmi les pays producteurs de maïs du Top 25 – France, Italie, Roumanie et Hongrie. L'Europe de l'ouest et de l'est devrait gagner jusqu'à 2,4 millions de tonnes annuellement ce qui est cohérent avec les estimations de Gianessi et al. (2003), qui ont prévu un gain de 1,9 millions de tonnes par an seulement pour la France, l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie.

17.3 Substitution des insecticides et taux de mycotoxines plus bas

Contrairement au coton Bt, les économies mondiales dans les insecticides liés au déploiement du maïs Bt pour le contrôle des Lépidoptères seront modestes. Les estimations prévues des économies mondiales en insecticides pour le maïs Bt sont de 3 à 5'000 tonnes annuellement, soit seulement 10 à 15 % du potentiel d'économies correspondantes des 33'000 tonnes d'insecticides pour le coton Bt. Cependant la réduction de l'application d'insecticides sur une plante destinée à la consommation humaine ou animale, a des implications énormes sur l'environnement et la santé et elle est chargée d'une valeur élevée tant par les fermiers que par la société. Les questions de sécurité de l'alimentation des hommes et des animaux en relation avec les plantes GM devient le centre d'intérêt et d'attention, particulièrement en Europe, où le maïs Bt a déjà démontré sa valeur en Espagne et pourrait aussi bénéficier aux pays voisins - France, Allemagne et Italie. L'expérience espagnole avec le maïs Bt démontre clairement aux pays voisins une trilogie d'avantages (Brookes 2002) qui sont difficiles à contester ou à rejeter. Premièrement, l'Espagne a confirmé qu'une augmentation de la productivité de 5 à 7 % peut être obtenue, ce qui résulte en un gain économique annuel de 28 millions de \$ (Gianessi et al. 2003). Deuxièmement, des études en Espagne (Castella et al. 1999) et en Italie (Pietri and Pavia 2000) ont montré que le niveau de mycotoxines dans le maïs conventionnel de la région peut s'élever à 20 ppm (un excès de dix fois par rapport au niveau recommandé de 2 ppm), alors que les maïs Bt correspondants présentent des niveaux inférieurs au taux recommandé de 2 ppm. Troisièmement, l'Espagne a été capable d'éliminer l'application des insecticides pour les nuisibles cibles de la pyrale et de la pyrale d'Europe dans les zones où le maïs Bt a été adopté. Ces trois avantages importants associés avec le maïs Bt représentent un avantage décisif en faveur de l'adoption du maïs Bt en France, Allemagne et Italie, qui assignent à la sécurité de l'alimentation humaine et animale une grande importance et ils rendent maintenant contradictoire la décision de rejeter le maïs Bt car il est connu pour avoir des niveaux plus bas de fumonisine, une toxine connue. Ceci semble contraire à la justification du principe de précaution

Table 55. Gains potentiels estimés suite au déploiement du maïs Bt avec le gène *cry1Ab* pour le contrôle des nuisibles du maïs, principalement les chenilles foreuses, dans les pays du Top 25 des pays producteurs de maïs

Pays <i>Catégorie de Gain</i> <i>(Millions de tonnes)</i>	Superficie récoltée (millions ha)	Production (millions de tonnes)	Catégorie d'infestation	Gain de récolte (%)	Gain minimum (millions de tonnes)	Fourchette de gains (millions de tonnes)
Catégorie 1: >10 millions de tonnes						
1. USA	28,5	228,7	M	5	4,6	4,6 à 11,4
Catégorie 2: 5-10 millions de tonnes						
2. Chine	24,5	124,2	M	5	2,5	2,5 à 6,2
Catégorie 3: 1-5 millions de tonnes						
3. Brésil	11,8	35,5	E	10	2,1	2,1 à 3,6
4. Mexique	8,0	19,0	E	10	1,1	1,1 à 1,9
5. Argentine	2,4	14,7	M	10	0,6	0,6 à 1,4
6. Inde	6,2	12,0	E	10	0,7	0,7 à 1,2
Catégorie 4: 0,5-1 millions de tonnes						
7. Indonésie	3,3	9,3	M	10	0,2	0,2 à 0,9
8. France	1,8	16,0	M	5	0,3	0,3 à 0,8
9. Italie	1,0	11,6	M	5	0,2	0,2 à 0,6
10. Nigeria	4,2	5,4	E	10	0,3	0,3 à 0,5
11. Afrique du Sud	3,3	9,1	M	5	0,2	0,2 à 0,5
Catégorie 5: <0,5 millions de tonnes						
12. Roumanie	2,9	8,5	M	5	0,1	0,1 à 0,4
13. Philippines	2,4	4,3	M	10	0,1	0,1 à 0,4
14. Canada	1,2	8,2	M	5	0,2	0,1 à 0,4
15. Thaïlande	1,1	3,9	M	10	0,2	0,2 à 0,4
16. Ethiopie	1,7	3,1	E	10	0,2	0,2 à 0,3
17. Kenya	1,5	2,7	E	10	0,2	0,2 à 0,3
18. Tanzanie	1,5	2,5	E	10	0,2	0,2 à 0,3
19. Yougoslavie	1,2	5,5	M	5	0,1	0,1 à 0,3
20. Hongrie	1,0	6,0	F	5	0,1	0,1 à 0,3
21. Malawi	1,5	1,6	E	10	0,1	0,1 à 0,2
22. Ukraine	1,3	4,2	F	5	0,1	0,1 à 0,2
23. Congo	1,4	1,1	E	10	0,1	0,1 à 0,1
24. Mozambique	1,3	1,1	E	10	0,1	0,1 à 0,1
25. Zimbabwe	1,0	0,8	M	10	<0,1	<0,1 à <0,1
Sous-total	116,0	539,0			14,8	14,8 à 32,8
	(84%)	(95%)				
AUTRES	22,9	63,0			0,7	0,7 à 1,6
TOTAL	138,9	602,0			15,5	15,5 à 34,4
	(100%)	(100%)				Moyenne 24,95

Source: Rassemblé par Clive James.

Les catégories d'infestation sont basées sur le pourcentage des superficies nationales infestées : TRACE 1 à 10% (moyenne de 5%) de la superficie nationale infestée; FAIBLE (F) 11 à 30% (moyenne 20%); MOYEN (M) 31 à 50% (moyenne de 40%); ELEVE (E) 51 à 70% (moyenne de 60%); TRES ELEVE (TE) plus de 70% de la superficie de maïs infestée.

suivi par l'Europe. Par coïncidence, les principaux bénéficiaires clés comme la Chine avec des très grandes superficies de maïs, ont testé en champ le maïs Bt à une période où l'Espagne est en train d'augmenter son adoption et où plusieurs nouveaux pays membres de l'Union Européenne réalisent eux aussi des tests en champs de grande ampleur du maïs Bt.

17.4 Le point de vue du fermier

L'expérience des fermiers avec le maïs Bt est positive et ils lui ont assigné une forte valeur parce que c'est une technologie pratique qui leur permet de gérer le risque dans un environnement incertain et offre une assurance contre les pertes de récolte importantes quand les infestations de nuisibles sont lourdes. A contrario, de l'utilisation d'insecticides et d'autres mesures dans une stratégie IPM, qui demande du temps pour la reconnaissance et les applications des insecticides adaptées aux niveaux seuils économiques dans des conditions météorologiques qui ne sont pas toujours optimales, le côté pratique du contrôle incorporé dans les semences via le maïs Bt s'est vu assigner une priorité très élevée par les fermiers.

Les informations provenant des pays producteurs de maïs Bt et des pays où les essais en champ ont été réalisés pour comparer le maïs Bt et les maïs non-Bt, étudiés dans ce chapitre, confirment que la technologie est sûre et qu'elle fournit un contrôle efficace des Lépidoptères nuisibles et des chrysomèles des racines du maïs, entraînant des augmentations de rendement, une diminution de la dépendance vis-à-vis des insecticides, conduisant à une augmentation de la profitabilité à cause de la baisse des coûts de production et de l'augmentation des rendements. Les informations sur la sévérité des infestations des nuisibles indiquent que des pays comme les USA dans les méga-environnements tempérés avec environ 40 % de la superficie de maïs ont déjà bénéficié de façon importante du maïs Bt et peuvent même gagner plus dans le futur comme les nouveaux gènes Bt et les autres gènes qui deviendront disponibles dans les trois prochaines

Table 56. Estimation des pertes mondiales dues aux nuisibles du maïs et gains du maïs Bt

Perte ou gain	1998
Pertes actuelles dues à tous les insectes nuisibles du maïs	- 9,0% Perte
Gain de récolte dû au contrôle des nuisibles par le gène cry1Ab	+ 4,5% Gain
Reste des pertes dues à d'autres insectes	- 4,5% Perte

Source: Clive James 2003

années. D'un autre côté, des pays comme la Chine, où la plupart du maïs est cultivé dans un méga-environnement, qui n'a pas adopté le maïs Bt à présent est susceptible de gagner beaucoup du déploiement des gènes Bt qui sont actuellement commercialisés ainsi que de la nouvelle génération de gènes Bt et des nouveaux gènes pour la résistance aux insectes. Cette conclusion est soutenue par le fait que l'adoption aux USA, qui a un niveau d'infestation moyen (40 % des superficies de maïs infestées), a déjà atteint 24 % d'adoption du maïs Bt en 2002 et grimpe à presque 30 % en 2003 (USDA/NAAS 2003), et une croissance continue qui est prévue dans le futur car l'adoption de produits avec des nouveaux gènes va apporter un contrôle plus efficace des principaux nuisibles.

Une étude détaillée récente des producteurs de maïs Bt aux USA (Pilcher et al.2002) montre que les fermiers sont de plus en plus conscients des pertes de récolte dues à la pyrale et ont une préférence pour la flexibilité que le maïs Bt offre. Après avoir obtenu des gains lors de la première expérience avec le maïs Bt et obtenu un excellent contrôle, les fermiers américains sont maintenant convaincus que la pyrale a causé des pertes plus importantes qu'ils ne l'avaient suspecté dans leur maïs conventionnel. Ceci fourni un stimulus pour que le nombre de fermiers cultivant du maïs Bt augmente. Des pays autres que les USA cultivant du maïs dans un méga-environnement comme l'Argentine bénéficient aussi

Table 57. Projection des gains relatifs de rendement pour différentes régions liés au déploiement du maïs Bt avec le gène *cry1Ab*

Région du monde	Gains en millions de tonnes (% du monde)	Valeur du Gain (\$)
Amérique du Nord	4,7 à 11,8 (34 %)	0,8 à 1,2 milliards
Asie	3,7 à 9,1 (26 %)	0,4 à 1,0 milliards
Amérique Latine	3,8 à 6,9 (20 %)	0,3 à 0,8 milliards
Afrique	1,4 à 2,3 (7 %)	0,1 à 0,02 milliards
Europe	0,8 à 2,4 (7 %)	<0,1 à 0,3 milliards
Autre	1,1 à 1,9 (6 %)	0,1 à 0,2 milliards
MONDE	15,5 à 34,4 (100%)	1,7 à 3,7 milliards

Source: Rassemblé par Clive James.

Valeur du maïs basée sur le prix international de 108 \$/tonnes de mi-2003 (World Bank 2003)

du maïs Bt avec un pourcentage de superficies de maïs cultivées avec du maïs Bt qui augmente chaque année depuis son adoption en 1998 jusqu'à 18 % en 2000, 24 % en 2001, 30 % en 2002 et devrait augmenter à 40 % en 2003. De manière similaire, le taux d'adoption du maïs jaune Bt en Afrique du Sud a augmenté chaque année depuis 1998, année où il a été adopté, à 14 % en 2001 puis à 20% en 2002 et devrait encore augmenter en 2003. Le maïs Bt blanc, introduit en Afrique du Sud en 2001, qui occupait 0,3 % en 2001, a augmenté de 10 fois en 2002 pour atteindre 3 % et devrait augmenter encore en 2003. Pour les pays en voie de développement comme le Brésil, qui n'a pas encore adopté le maïs Bt, les gains potentiels seront supérieurs à ceux des pays tempérés comme les USA ou la Chine. La raison de ceci est que le Brésil cultive le maïs dans un méga-environnement sub-tropical/tropical où les niveaux d'infestation sont élevés (60 % de la superficie est infestée) en comparaison avec les méga-environnements tempérés comme les USA et la Chine qui ont des infestations relativement plus faibles (40 % de la superficie de maïs est infestée).

17.5 Opportunités et défis

D'un point de vue mondial, le potentiel du maïs Bt à court terme est considéré actuellement comme le meilleur produit GM. Il y a plusieurs raisons pour

cela.

- Premièrement, le gène *cry1Ab* a fourni un contrôle efficace des nuisibles les plus importants, principalement les chenilles foreuses, et un contrôle partiel pour les autres nuisibles comme les noctuelles et les vers de l'épi de maïs. La performance probante du maïs Bt (*cry1Ab*) a entraîné son adoption rapide sur 43 millions d'hectares dans sept pays, depuis son introduction en 1996.
- Deuxièmement, les nouveaux produits Bt déjà lancés y compris le gène *cry3Bb1* pour le contrôle des chrysomèles aux USA en 2003 et le gène *cryIFa2* qui augmente le contrôle tant pour le légionnaire d'automne et la noctuelle ypsilon. De plus, il y a cinq nouveaux produits avec des gènes Bt ou autres, dont le lancement est prévu dans les trois prochaines années, qui vont apporter la diversité nécessaire dans les modes d'action pour permettre un contrôle encore plus efficace sur un éventail encore plus large d'insectes nuisibles du maïs.
- Troisièmement, en plus des avantages significatifs que le maïs Bt offre en tant qu'outil, le produit offre des aliments pour

les hommes et les animaux plus sûrs que le maïs conventionnel avec des niveaux de mycotoxines plus bas, qui vont probablement devenir un attribut de plus en plus important car la sécurité de l'alimentation humaine et animale continue à avoir une priorité très forte.

- Finalement, des trois principaux aliments de base (maïs, blé et riz), à l'heure actuelle, seul le maïs offre des bénéfices importants de la biotechnologie. Le maïs Bt peut maintenant offrir un éventail d'options de plus en plus large pour répondre aux besoins des environnements dans lesquels le maïs est cultivé et des possibilités caractérisées par les méga-environnements dans des pays clés discutées dans ce chapitre.

Environ 75 pays tant du monde industrialisé que du monde en voie de développement cultivent au moins 100'000 d'hectares de maïs chacun, soit un total de 140 millions d'hectares qui produisent 600 millions de tonnes par an, évaluées à 65 milliards de \$ annuellement. Les pertes mondiales dues à tous les insectes nuisibles du maïs provoquent des pertes de 9 % soit 52 millions de tonnes, évaluées à 5,7 milliards de \$ annuellement. Le gène *cry1Ab* a le potentiel d'augmenter la production de maïs jusqu'à 35 millions de tonnes, évaluées à 3,7 milliards de \$ et de diminuer les pertes de la moitié (de 9 à 4,5%). Les gènes récemment autorisés, *cry3Bb1* et *cry1Fa2*, sont les premiers de la nouvelle génération de gènes qui viennent renforcer le gène *cry1Ab* d'origine qui a eu une contribution importante et qui a ouvert de nouveaux modes efficaces de gestion des nuisibles. La famille actuelle de gènes Bt devrait être complétée par cinq autres nouveaux produits de gènes dans les trois prochaines années qui incluront : le gène double gène *cryAb1/cry3Bb1*; le gène double *cry34Ab1/cry35Ab1*; un gène *cry1Ab* entier ; les gènes complets empilés *cry1Ab/vip3a*, et un gène entier modifié *cry3Aa*. Cette impressionnante famille de gènes simples ou empilés et de nouveaux gènes va entraîner une amélioration marquée des systèmes de gestion des nuisibles du maïs. Elle va aussi être dotée une diversité de gènes qui va permettre aux insectes

nuisibles du maïs d'être contrôlés dans des bons programmes de gestion des nuisibles qui utilisent des stratégies de gestion des résistances aux insectes (IRM) qui optimiseront la durabilité de Bt et des nouveaux gènes et leur permettront d'être déployé de manière durable, efficace et responsable pour le bénéfice de la société mondiale.

Le gain de rendement potentiel de 35 millions de tonnes est à la portée de la première génération de maïs Bt (*cry1Ab*), avec des gains plus importants qui viendront avec la seconde génération de maïs Bt et de la nouvelle technologie de gènes, est considéré non seulement comme souhaitable mais il est jugé comme une contribution critique pour l'augmentation de la demande mondiale de maïs en 2020, quand, pour la première fois, la demande de maïs excédera les demandes pour le riz et le blé à la fois. Le défi est de produire 266 millions de tonnes supplémentaires mondialement afin de répondre à la demande mondiale sans précédent d'environ 850 millions de tonnes en 2020. Le gain potentiel de 35 millions de tonnes de maïs Bt se monte à une contribution de presque 15 % aux 266 millions de tonnes supplémentaires nécessaires en 2020. Des 266 millions de tonnes supplémentaires nécessaires mondialement en 2020, 80 % ou 213 millions de tonnes, seront demandés par les pays en voie de développement et le formidable défi pour eux est d'optimiser la production nationale afin de répondre à leurs propres besoins, les importations fourniront environ 10 %. Il est prévu que le maïs Bt ait le potentiel technologique de délivrer des bénéfices sur 40 à 45 millions d'hectares dans le court à moyen terme ce qui doit être comparé avec les 10 millions d'hectares qu'il occupe aujourd'hui. Cela devrait fournir la motivation pour les principaux pays en voie de développement consommant du maïs, comme la Chine et le Brésil pour autoriser et adopter le maïs Bt et ainsi bénéficier des multiples et importants bénéfices qu'il offre en terme de sécurité et d'alimentation humaine et animale plus abordable. Ceci est, par coïncidence, une contribution majeure à la diminution de la faim et de la mal-nutrition qui demande 24'000 livres par jour dans les pays en voie de développement d'Asie, d'Afrique et d'Amérique Latine.

REMERCIEMENTS

C'est un plaisir de remercier beaucoup de collègues des secteurs publics et privés dans les pays industrialisés et en voie de développement, pour leur gentillesse à fournir des conseils et des données. Sans leur collaboration cette publication n'aurait pas été possible. Cependant, en premier, des remerciements très spéciaux pour ma femme, Glenys James, qui a loyalement et volontairement donné des semaines de son temps pendant huit années consécutives pour mettre tout le texte et les tables de cette étude annuelle – sans son aide, son encouragement et son soutien, il ne m'aurait pas été possible de compléter cette étude détaillée. Des remerciements spéciaux pour m'avoir, gratuitement, permis de reproduire ou fourni l'accès à des données publiées ou non : Cropnosis (anciennement Wood Mackenzie) Edinburgh, Scotland (avec l'aimable autorisation de Gautam Sirur, Kin Cheung et Fred Mathisen); CIMMYT au Mexique avec l'aimable autorisation de Mike Morris, David Hodson et David Bergvinson; le Conseil pour les Sciences et la Technologie Agricoles (CAST); Science Publications, Enfield, N.H., USA. Mes remerciements sincères aux collègues suivants : Patricia Ahl Goy, Ariel Alvarez, Atanas Atanassov, Klaus Ammann, Jane Bachman, Simon Barber, Raju Barwale, John Benedict, Sheena Bethell-Cox, Wally Beversdorf, JoAnne Buth, Joe Bothe, Norman Borlaug, Kyd Brenner, Moises Burachik, Janet Carpenter, Victor Castro, Zhangliang Chen, Nam-Hai Chua, Ronnie Coffman, Philip Dale, Greg Dana, Randy Deaton, Willy De Greef, Juan Dellacha, Keith Downey, Chris Dowswell, Sam Dryden, Adrian Dubock, Don Duvick, Eva Erisgen, Shereen El Feki, Richard Flavell, Roy Fuchs, Michael Gale, Leonard Gianessi, Val Giddings, Harvey Glick, Major Goodman, Wally Green, Kater Hake, Mike

Hammig, Bruce Hammond, Randy Hautea, John Headrick, Dafang Huang, Jikun Huang, Rifa Hu, David Hume, Bob Ingratta, Shi-Rong Jia, Lo Jing, Wojciech Kaniewski, Doyle Karr, Juan Kiekebusch, Lutz Knabe, Quentin Kubicek, Bernard Le Buanec, Bruce Lee, Leila Macedo Oda, Magdy Madkour, Barbara Mazur, Morven McLean, Terry Medley, Ron Meeusen, David Miller, Jill Montgomery, Walt Mullins, Erich-Christian Oerke, Danie Olivier, Dean Oestreich, Elizabeth Owens, Jay Pershing, Gabrielle Persley, John Pierce, Martin Piniero, Carl Pray, John Purcell, Matin Qaim, Sanjaya Rajaram, Ernst Rasche, Andrew Reed, Mark Rosegrant, Clara Rubenstein, Eric Sachs, Peter Scott, Konstantin Skryabin, Sutat Sriwatanapongse, Paul Teng, Jennifer Thomson, Gary Toenniessen, Rod Townsend, Greg Traxler, Eduardo Trigo, Shannon Troughton, Victor Trucco, Wynand van der Walt, Jasper Van Zanten, Marin Velcev, Sam Wakhusama, Guo Ying Wang, Qinfang Wang, Jocelyn Webster, Felicia Wu, Silvia Yokohama, Usha Barwale Zehr, and Eddie Zhu. Dernier point mais pas le moindre, je voudrais remercier le Dr. Randy Hautea, (Coordinateur mondial de l'ISAAA et directeur de l'ISAAA Centre de l'Asie du sud-est aux Philippines) et ses collaborateurs capables pour la révision et l'expédition du manuscrit pour la publication ; l'équipe de l'ISAA comprend Mariechel Navarro, Clement Dionglay, John Philip Magbanua, Monina Villena, Fely Almasan, Panfilo De Guzman, Teresita Victoria, et Patricia Meenen. Bien que l'aide de toutes les personnes mentionnées ci-dessus soit sincèrement remerciée et fortement appréciée, l'auteur prend la pleine responsabilité pour les opinions exprimées dans cette publication et pour toute erreur ou omission ou mauvaise interprétation.

REFERENCES

- Agricultural Research Service (ARS). 2001. Area wide pest management of corn rootworm in maize production systems. 2001 Annual Report.
- Alcade, E. 1999. Estimated losses from the European Corn Borer. Symposium de Sanidad Vegetal. Sevilla, Spain.
- Al-Deeb, M.A., G.E. Wilde, and R.A. Higgins. 2001. No effect of *Bacillus thuringiensis* corn and *Bacillus thuringiensis* on the predator *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae). *Environ. Entomol.* 30:625-629.
- Alston, J.M., J. Hyde and M.C. Marra. 2002. An ex ante analysis of the benefits from the adoption of Monsanto's corn rootworm resistant varietal technology – rootworm. *Tech. Bull. 103*. National Science Foundation Center for Integrated Pest Management, Raleigh, NC, USA.
- American Corn Growers Association. 2002. www.acga.org/news/2002/120402.htm.
- American Council on Science and Health <http://www.acsh.org/press/editorials/gmfood121200.html>
- AMA. (American Medical Association) /Council on Scientific Affairs (CSA). 2000. Genetically modified crops and foods (I-00). CSA Report 10 at the 2000 Interim AMA Meeting. <http://www.ama-assn.org/ama/pub/article/2036-4030.html#Recommendations>
- APS. American Phytopathological Society. 2001. Genetically modified insect resistant corn: implications for disease management. <http://www.scisoc.org/feature/BtCorn/Top.html>. Accessed June 30, 2001.
- Anglade, P. and S. Rautou. 1970. Current status of breeding corn in France for resistance to the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn), EPPO Publication No 54 pp. 45-55.
- Anonymous. 2003. Pakistan deals with China. *Nature Biotechnology* 21(10):1126. 1 October 2003.
- Anonymous. 2001. GM crops and insects; Butterfly balls. 21 September 2001. p. 65. *The Economist*, London, UK
- Aquino, P., F. Carrion and R. Calvo. 1999. Selected Maize Statistics. CIMMYT 1997/98 World Maize Facts and Trends: Maize Production in Drought Stressed Environments. Technical Options and Research Resource Allocation. CIMMYT, Mexico DF, Mexico.
- Astwood, J.D., J.N. Leach and R.L. Fuchs. 1996. Stability of food allergens to digestion in vitro. *Nature Biotechnology* 14(10):1269-1273.
- Astwood, J.D. and R.L. Fuchs. 2001. Status and safety of biotech crops. In: Baker, D.R. and N.K. Umetsu (eds.). *Agrochemical Discovery: Insect, Weed and Fungal Control*. American Chemical Society Symposium Series No. 774. pp. 152-164.
- Bakan, B., D. Melcion, D. Richard-Molard and B. Cahagnier. 2002. Fungal growth and Fusarium mycotoxin content in isogenic traditional maize and genetically modified maize grown in France and Spain. *J. Agric. Food Chem.* 50:728-731.
- Ball, H.J. and G.T. Weekman. 1962. Insecticide resistance in the adult western corn rootworm in Nebraska. *J. Econ. Entomol.* 55:439-441.
- Bauman, L.F. and P.L. Crane. 1985. Hybrid corn – history, development, and section considerations. National Corn Handbook, NCH-29 <http://www.agcom.purdue.edu/AgCom/Pubs/NCH/NCH-29.html>
- Benbrook, C. 2001. The farm level impacts of Bt corn from 1996 through 2001: An independent national assessment. Benbrook Consulting Services, Sandpoint, Idaho. <http://www.biotech-info.net>
- Benedict, J.H and D.R. Ring. 2003. *Transgenic Crops Expressing Bt Proteins: Current Status, Challenges and Outlook*. In: *Transgenic Crop Protection, Concepts and Strategies*. Ed. O. Koul and G.S. Dhaliwal, Science Publishers, USA.
- Benedict, J. and D.W. Altman. 2001. Commercialization of transgenic cotton expressing insecticidal crystal protein. In: Jenkins, J. and S. Saha (eds.). *Genetic Improvement of Cotton: Emerging Technologies*. Science Publications, Enfield, New Hampshire,

- USA. pp.137-201.
- Berberich, S., J. Ream, T. Jackson, R. Wood, R. Stipanovic, P. Harvey, S. Patzer, R. Fuchs. 1996. Assessment of insect-protected cotton: The composition of insect-protected cottonseed is equivalent to that of conventional cottonseed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44(1):365- 371.
- Bernstein, I.L., J.A. Bernstein, M. Miller, S. Tierzieva, D.I. Bernstein, Z. Lummus, M.K. Selgrade, D.L. Coerfler, and V.L. Seligy. 1999. Immune responses in farm workers after exposure to *Bacillus thuringiensis* pesticides. *Environ. Health Perspect.* 107:575-582.
- Betz, F.S., B.G. Hammond and R.L. Fuchs. 2000. Safety and advantages of *Bacillus thuringiensis* (Bt)-protected plants to control insect pests. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 32:156-173.
- Bhat, R.V. and J.D. Miller. 1991. Mycotoxins and the food supply. *Food, Nutrition and Agriculture* 1:27-31.
- Bode, W.M., D.D. Calvin and C.E. Mason. 1990. Yield-loss relationships and economic injury levels for European corn borer populations (Lepidoptera: Puralidae) infecting Pennsylvania field corn. *J. Econ. Entomol.* 83:1595-1603.
- Bohn, M., R.C. Kreps, D. Klein and A.E. Melchinger. 1999. Damage and grain yield losses caused by European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) in early maturing European maize hybrids. *J. Econ. Entomol.* 92:723-7311.
- Brookes, G. 2002. The farm level impact of using Bt maize in Spain. <http://www.europabio.org>
- Bucci, T.J., D.K. Hansen and J.B. Laborde. 1996. Leukoencephalomalacia and hemorrhage in the brain of rabbits gavaged with mycotoxin fumonisin B1. *Nat Toxins* 4(1):51-52.
- Cardwell, K.F., F. Schulthess, R. Ndehmah and Z. Ngoko. 1997. A systems approach to assess crop health and maize yield losses due to pests and diseases in Cameroon. *Ecosyst. Environ.* 65:33-47
- Carpenter, J., A. Felsot, T. Goode, M. Hammig, D. Onstad and S. Sankula. 2002. Comparative environmental impacts of biotechnology-derived and traditional soybean, corn, and cotton crops. Council for Agricultural Science and Technology (CAST): Ames, Iowa, USA. 189 pp. <http://www.w.cast-science.org/pubs/biotechcropsbenefit.pdf>
- Carpenter, J.E. and L.P. Gianessi. 2002. Trends in pesticide use since the introduction of genetically engineered crops. In: Kalaitzandonakes, N. (ed.). *Economic and Environmental Impacts of Agbiotechnology: A Global Perspective*. Kluwer-Plenum Publishers, New York.
- Carpenter, J.E. and L.P. Gianessi. 2001. Agricultural biotechnology: Updated benefit estimates. National Center for Food and Agricultural Policy, Washington, DC, USA. January 2001.
- CAST. (Council for Agricultural Science and Technology). 2003. Mycotoxins: Risks in Plant, Animal, and Human Systems. *Council for Agricultural Science and Technology Task Force Report No.139*. January 2003.
- Castella, G., M.R. Bragulat, and F.J. Cabanes. 1999. Surveillance of fumonisins in maizebased feeds and cereals from Spain. *J. Agric. Food Chem.* 47:4707-4710.
- CFSAN (Center for Food Safety and Applied Nutrition). 2001. Background paper in support of fumonisin levels in corn and corn products intended for human consumption. USFDA Center for Food Safety and Applied Nutrition and the Center for Veterinary Medicine. <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/fumonbg3.html> (verified 6 April 2002). USFDA.
- Chakrabarti, S.K., A. Mandaokar, P.A. Kumar and R.P. Sharma. 1998. Efficacy of lepidopteran specific delta-endotoxins of *Bacillus thuringiensis* against *Helicoverpa armigera*. *J. Invert. Pathology* 72:336-337.
- Cheng, S.J., Y.Z. Jiang, M.H. Li and H.Z. Lo. 1985. A mutagenic metabolite produced by *Fusarium moniliforme* isolated from Linxian County, China. *Carcinogenesis*. 6:903-905.

REFERENCES

- Christou, P. 2002. Editorial: No credible scientific evidence is presented to support claims that transgenic DNA was introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Transgenic Research* 11(1):3-5(3). February 2002.
- Chu, F.S. and G.Y. Li. 1994. Simultaneous occurrence of fumonisin B1 and other mycotoxins in moldy corn collected from the People's Republic of China in regions of high incidences of esophageal cancer. *Appl. Environ. Microbiol.* 60:847-852.
- CIMMYT Website. 2001.
- CIMMYT. 2000. World Maize Facts and Trends. CIMMYT, Mexico.
- Codex Alimentarius Commission's ad hoc TF on foods derived from biotechnology. <http://www.codexalimentarius.net/>
- Colvin, B.M. and L.R. Harrison. 1992. Fumonisin-induced pulmonary edema and hydrothorax in swine. *Mycopathologia* 117:79-82.
- Constable, P.D., G.W. Smith, G.E. Rottinghaus and W.M. Haschek. 2000. Ingestion of fumonisin B1 containing culture material decreases cardiac contractility and mechanical efficiency of swine. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 162:151-160.
- Coppolino, M., M. Bressan and R. Vergolani. 1985. Effetti dell'infestazione da 2^o generazione di *Ostrinia nubilalis* Hb sulla produttività di ibridi di mais. (Effects of infestation by the 2nd generation of *Ostrinia nubilalis* Hb on the productivity of maize hybrids). *Lé Informatore Agrario* 41(44):53-59.
- Crawley, M.J., S.L. Brown, R.S. Hails, D.D. Kohn and M. Rees. 2001. Transgenic crops in natural habitats. *Nature* 409:682-683.
- Crecchio, C. and G. Stotzky. 2001. Biodegradation and insecticidal activity of the toxin from *Bacillus thuringiensis* subsp. *Kurstaki* bound on complexes of montmorillonite-humic acids-Al hydroxypolymers. *Soil Biol. Biochem.* 33:573-581.
- Cropnosis Agrochemical Service. 2003. Edinburgh, Scotland, UK. DEFRA. (Department of Environment, Food and Rural Affairs). 2003. New pest of maize found in the UK. London, UK: DEFRA. News release, 4 September 2003.
- Degenhardt, H., F. Horstmann and N. Mülleler. 2003. Bt maize in Germany: Experience with cultivation from 1998 to 2002. ANABU Journal.
- De Groote, H. 2002. Maize yield losses from stemborers in Kenya. *Insect Sci. Applic.* 22(2):89-96.
- De Groote, H., W. Overholt, J.O. Ouma and S. Mugo. 2003. Assessing the potential impact of Bt maize in Kenya using a GIS based model. Paper presented at the International Agricultural Economics Conference, Durban, South Africa, August 2003.
- Dhaliwal, G.S. and R. Arora. 1996. *Principles of Insect Pest Management*. National Agricultural Technology Information Centre, Ludhiana, Punjab, India. 374 pp.
- Doko, M.B. and A. Visconti. 1994. Occurrence of fumonisins B1 and B2 in corn and cornbased human foodstuff in Italy. *Food Addit. and Contam.* 11:433-439.
- Dow AgroSciences. 2003. Pest control by *cry1Fa2* in Event TC1507. Personal Communication. 166
- Dowd, P.F. 2001. Biotic and abiotic factors limiting efficacy of Bt corn in indirectly reducing mycotoxin levels in commercial fields. *J. Econ. Entomol.* 94:1067-1074.
- Dowd, P.F. 2000. Indirect reduction of ear molds and associated mycotoxins in *Bacillus thuringiensis* corn under controlled and open field conditions: utility and limitations. *J. Econ. Entomol.* 93:1669-1679.
- Dowd, P.F., R.W. Behle, M.R. McGuire, T.C. Nelsen, B.S. Shasha, F.W. Simmons and F.E. Vega. 1998. Adherent malathion flour granules as an environmentally selective control for chewing insect pests on dent corn ears: Insect control. *J. Econ. Entomol.* 91:1058-1066.

- Dowswell, C.R., R.L. Paliwal and R.P. Cantrell. 1996. *Maize in the Third World*. Westview Press, Boulder, Colorado, USA.
- Duan, J.J., G. Head, M.J. McKee, T.E. Nickson, J.W. Martin and F.S. Sayegh. 2002. Evaluation of dietary effects of transgenic corn pollen expressing Cry3Bb1 protein on a nontarget ladybird beetle, *Coleomegilla maculata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 104:271-280.
- Dutton, A., H. Klein, J. Romeis and F. Bigler. 2002. Uptake of Bt toxin by herbivores feeding on transgenic maize and consequences for the predator *Chrysoperla carnea*. *Ecological Entomology* 27:441-447.
- Edge, J.M., J.H. Benedict, J.P. Carroll and H.K. Reding. 2001. Bollgard® cotton: An assessment of global economic, environmental, and social benefits. *The Journal of Cotton Science. The Cotton Foundation*. 5:121-136. <http://www.jeotsci.org>
- Edrington, T.S., C.A. Kamps-Holtzapfle, R.B. Harvey, L.F. Kubena, M.H. Elissalde and G.E. Rottinghaus. 1995. Acute hepatic and renal toxicity in lambs dosed with fumonisin-containing culture material. *J. Anim. Sci.* 73(2):508-515.
- Estes, T.L., R. Allen, R.L. Jones, D.R. Buckler, K.H. Carr, D.I. Gustafson, C. Gustin, M.J. McKee, A.G. Hornsby and R.P. Richards. 2001. Predicted impact of transgenic crops on water quality and related ecosystem in vulnerable watersheds in the United States. Paper presented at the *Soil and Water Mini-Symposium, British Crop Protection Conference Weeds 2001*. Brighton, UK.
- European Network Safety Assessment of Genetically Modified Food Crops (ENTRANSFOOD). <http://www.entransfood.com>
- Evans, M.M.S. and J.L. Kermicle. 2001. Teosinte crossing barrier1, a locus governing hybridization of teosinte with maize. *Theor. Appl. Genet.* 103:259-265.
- FAOSTATS. 2002.
- FAO. 2001. Statistical Development Series 9 A: Supplement to the Report on the 1990 Census of Agriculture.
- FAO/WHO. 2000. Safety aspects of genetically modified foods of plant origin. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation on Foods Derived from Biotechnology. WHO, Geneva, Switzerland. 29 May – 2 June 2000.
- Felsot, A.S. 1989. Enhanced biodegradation of insecticides in soil: Implications for agroecosystems. *Ann. Rev. Entomol.* 34:453-476.
- Ferdu, A. 1991. Biology and economic importance of maize stalk borers, *Busseola fusca* in Awassa, Southern Ethiopia. M.Sc. Thesis. Alemaya University of Agriculture, Alemaya, Ethiopia.
- Fincham, J.E., W.F.O. Marasas, J.J.F. Taljaard, N.P.J. Kriek, C.J. Badenhorst, W.C.A. Gelderblom, J.V. Seier, C.M. Smuts, M. Faber, M.J. Weight, W. Slazus, C.W. Woodroof, M.J. van Wyk, M. Kruger and P.G. Thiel. 1992. Atherogenic effects in a non-human primate of *Fusarium moniliforme* cultures added to a carbohydrate diet. *Atherosclerosis* 94:13-25.
- FIS. (International Seed Federation). 2001. World Seed Statistics. <http://www.worldseed.org/stat.html>
- Food Standards Agency. http://www.foodstandards.gov.uk/gmdebate/aboutgm/gm_safety?view=GM+Microsite
- Franceschi, S., E. Bidoli, A.E. Barón, and C. La Vacchia. 1995. Maize and risk of cancer of the oral cavity, pharynx and esophagus in northeastern Italy. *J. Natl. Cancer Inst.* 82:1407-1411.
- Freedonia Group Inc. 2002. Personal communication. *World Agricultural Biotechnology: Transgenic Crops*. Freedonia Group Inc., Cleveland, Ohio, USA.
- French Academy of Medicine. http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/RST13_summary.pdf

REFERENCES

- Fuchs, R., J. Ream, B. Hammond, M. Naylor, R. Leimgruber and S. Berberich. 1993. Safety assessment of the neomycin phosphotransferase II (NPTII) protein. *Bio/Technology* 11(13):1543-1547.
- Fundacion Antama. 2003. <http://www.fundacion-antama.org/>
- Garcia-Olmedo, F. 2003. Transgenic Crops in Spain. In: Kalaitzandonakes, N. (ed.). *The Economic and Environmental Impact of Agbiotech: A Global Perspective*. Kluwer Academic Press/Plenum Publishers, New York, USA.
- Gelderblom, W.C.A. PROMEC Unit, Medical Research Council, Tygerberg, South Africa, unpublished data.
- Gelderblom, W.C.A., S. Abel, C.M. Smuts, J. Marnewick, W.F.O. Marasas, E.R. Lemmer and D. Ramljack. 2001. Fumonisin-induced hepatocarcinogenesis: Mechanisms related to cancer initiation and promotion. *Environ. Health Perspect.* 109(suppl. 2):291- 300.
- Gelderblom, W.C.A., M.E. Cawood, S.D. Snyman, R. Vlegaar and W.F.O. Marasas. 1993. Structure-activity relationships of fumonisins in short-term carcinogenesis and cytotoxicity assays. *Food Chem. Toxicol.* 31:407-414.
- Gelderblom, W.C.A., N.P.J. Kreik, W.F.O. Marasas, and P.J. Thiel. 1991. Toxicity and carcinogenicity of the *Fusarium moniliforme* metabolite, fumonisin B1, in rats. *Carcinogenesis* 12:1247-1251.
- Gelineau-van Waes, J., J. Maddox, L. Grabowski, S. Heller and G. Bennett. 2002. Role of folate in fumonisin B1-induced neural tube defects. *Mycopathologia* 155(1,2):36.
- Gianessi, L., S. Sankula and N. Reigner. 2003. Plant biotechnology: Potential impact for improving pest management in European agriculture - Maize case study. National Center for Food and Agriculture Policy (NCFAP), Washington, DC, USA.
- Gianessi, L.P., C.S. Silvers, S. Sankula and J.E. Carpenter. 2002. Plant biotechnology: Current and potential impact for improving pest management in U.S. agriculture. An analysis of 40 case studies. National Center for Food and Agricultural Policy (NCFAP), Washington, DC, USA. <http://www.ncfap.org/>
- Glick, H. and J. Pershing. 2003. The billion dollar bug: A new transgenic solution for maize growers. Personal communication.
- Gonzalez, F.C. and M.M. Goodman. 1997. Research on gene flow between improved maize and landraces. In: CIMMYT. *Gene Flow Among Maize Landraces, Improved Maize Varieties, and Teosinte: Implications for Transgenic Maize*. CIMMYT, Mexico. pp. 67- 72. http://www.cimmyt.org?ABC?Geneflow/gene_flow_pdf_Engl/contents.htm
- Gonzalez, L.A. 2002. Likely transcendental effects of agri-biotechnology. The case of Bt hybrid corn in the Philippines. STRIVE Foundation, Los Banos, Laguna, Philippines. February 2002.
- Gonzalez-Nunez, M., F. Ortego and P. Castanera. 2000. Susceptibility of Spanish populations of the corn borers *Sesamia nonagrioides* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) to a *Bacillus thuringiensis* endotoxin. *J. Econ. Entomol.* 93:459-463.
- Gounou, S., F. Schultess, T. Shanower, W.N.O. Hammond, H. Braima, A.R. Cudjoe and K.K. Antwi with I. Olaleye. 1994. Stem and ear borers of maize in Ghana. *Plant Health Management Research Monograph No.4*.
- International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. Hammond B., K. Campbell, A. Robinson, T. Degooyer, J. Richard, J. Segueira, J. Cea, M. Pancke, L. Pinson, C. Radu, H. Esin, F. Tatli and R. Grogna. 2004. Reduction of fumonisin levels in grain from YieldGard® corn borer. *Mycopathologia* (In press).
- Hammond, B., K.W. Campbell, C.D. Pilcher, T.A. DeGooyer, A.E. Robinson, B.L. McMillen, S.M. Spangler, S.G. Riordan, L.G. Rice and J.L. Richard. 2003. Reduction of fumonisin

- mycotoxins in the grain of YieldGard® corn borer hybrids grown in the United States in 2000-2002. (Paper submitted).
- Hammond, B., K. Campbell, C. Pilcher, T. DeGooyer, A. Robinson, L. Rice, A. Pietri, G. Piva, D. Melcion and B. Cahagnier. 2002. Reduction of fungal and fumonisin levels in Bt corn. *Mycopathologia* 155(1,2):22.
- Hammond, B. and R.L. Fuchs. 1998. Safety evaluation of food crops developed through biotechnology. In: Thomas, J.A. (ed.). *Biotechnology and Safety Assessment, 2nd edition*. Taylor & Francis Ltd., London, UK. pp. 61-79.
- Harrison, L. A., M.R. Bailey, M. Naylor, J. Ream, B. Hammond, D.L. Nida, B. Burnette, T.E. Nickson, T. Mitsky, M.L. Taylor, R.L. Fuchs and S.R. Padgett. 1996. The expressed protein in glyphosate-tolerant soybean, 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase from *Agrobacterium* sp. strain CP4 is rapidly digested *in vitro* and is not toxic to acutely gavaged mice. *Journal of Nutrition* 126(3):728-740.
- Harrison, L.R., B.M. Colvin, G.T. Greene, L.E. Newman and J.R. Cole. 1990. Pulmonary edema and hydrothorax in swine produced by fumonisin B1, a toxic metabolite of *Fusarium moniliforme*. *J. Vet. Diagn. Invest.* 2:217-221.
- Haschek, W.M., A.L. Waggoner, S. Hsiao, G.W. Smith, M.E. Tumbleson, R.M. Eppley, J.H. Foreman and P.D. Constable. 2003. Clinicopathological characterization of Fumonisin B1 (FB1) induced hepato-, nephroand neuro-toxicity in horses. *Toxicol. Sci.* 72:252.
- Haschek W.A., L.A. Gumprecht, G. Smith, M.E. Tumbleson and P.D. Constable. 2001. Fumonisin toxicoses in Swine: An overview of porcine pulmonary edema and current perspectives. *Environ. Health Perspect.* 109(suppl. 2):251-257.
- He, K., Z. Wang, D. Zhou, L. Wen, Y. Song and Z. Yao. 2003. Evaluation of transgenic Bt corn for resistance to the Asian corn borer (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Econ. Entomology* 96(3):935-940.
- Head, G., C.R. Brown, M.E. Groth and J.J. Duan. 2001. Cry1Ab protein levels in phytophagous insects feeding on transgenic corn: Implications for secondary exposure risk assessment. *Entomol. Exp. Applic.* 99:37-45.
- Hellmich, R.L., B.D. Siegfried, M.K. Sears, D.E. Stanley-Horn, M. J. Daniels, H.R. Mattila, T. Spencer, K.G. Bidne, and L.C. Lewis. 2001. Monarch larvae sensitivity to *Bacillus thuringiensis*- purified proteins and pollen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11925-11930. (10.1073/pnas.211297698).
- Hendricks, K. 1999. Fumonisin and neural tube defects in South Texas. *Epidemiology* 10:198-200. Hilbeck, A., W.J. Moar, M. Pusztai-Carey, A. Filippini and F. Bigler. 1999. Prey-mediated effects of Cry1Ab toxin and protoxin and Cry2A protoxin on the predator *Chrysoperla carnea*. *Entomol. Exp. Appl.* 91:305-316.
- Hilbeck, A., M. Baungartner, P.M. Fried and F. Bigler. 1998. Effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn-fed prey on mortality and development time of immature *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Environ. Entomol.* 27:480-487.
- Hill, D.S. 1983. *Agricultural Insect Pests of the Tropics and Their Control*. Cambridge University Press, Cambridge. 746 pp.
- Howard, P.C., R.M. Eppley, M.E. Stack, A. Warbritton, K.A. Voss, R.J. Lorentzen, R.M. Kovach and T.J. Bucci. 2001. Fumonisin B1 carcinogenicity in a two-year feeding study using F344 rats and B6C3F1 mice. *Environ. Health Perspect.* 109(suppl. 2):277-282.
- Huang, J. and Q. Wang. 2003. Agricultural biotechnology development and policy in China. *AgBioForum* 5(4):122-135.
- Huang, J., S. Rozelle, C. Pray, and Q. Wang. 2002. Plant biotechnology in China. *Science* 295:674-677.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2002. Some traditional herbal medicines, some

REFERENCES

- mycotoxins, naphthalene and styrene. *IARC Monograph 82*. Lyon, France: IARC.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 1993. Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins. *IARC Monograph 56*. Lyon, France: IARC.
- IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2003. Cereal demands in 1997 and 2020. Personal communication. Washington, DC, USA.
- Industry Source. 2003a. Data on gains from Bt maize in the US 1995 – 2002; 8,900 comparisons. Personal communication.
- Industry Source. 2003b. Survey and trial results for gains from Bt maize in Italy in 1997. Personal communication.
- Industry Source. 2003c. Gains from Bt maize trials in Argentina 1990s – 2002 based on 1,500 data points. Personal communication.
- Industry Source. 2003d. Bt maize field experiments in Argentina 2000 – 2003. Personal communication.
- Industry Source. 2003e. Bt maize field experiments in Brazil 1999 – 2001. Personal communication.
- Industry Source. 2003f. Yield gains in Bt maize trials in four regions in Honduras 2002. Personal communication.
- Industry Source. 2003g. Bt maize field experiments in China in 1998. Personal communication.
- Industry Source. 2003h. Bt maize field experiments in China in 1998. Personal communication.
- Industry Source. 2003i. Bt maize field trials in China in 1998. Personal communication.
- Industry Source. 2003j. Bt maize field trials in China in 1997. Personal communication.
- International Council for Science. <http://www.icsu.org/IPCS> (International Programme on Chemical Safety). 2000.
- International Programme on Chemical Safety - Environmental Health Criteria 219: Fumonisin B1. http://www.who.int/pcs/docs/ehc_219.html
- James, C. 2002a. Preview: Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2002. *ISAAA Briefs No. 27*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 24 pp.
- James, C. 2002b. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2001 Feature: Bt Cotton. *ISAAA Briefs No. 26*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 184 pp.
- James, C. 2001a. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2000. *ISAAA Briefs No. 23*. ISAAA, Ithaca, NY. 110 pp.
- James, C. 2001b. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2001. *ISAAA Briefs No. 24: Preview*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 20 pp.
- James, C. 2001c. The activities of the International Service for the Acquisition of Agribiotech Applications (ISAAA) in crop biotechnology transfer. *Journal of Science and Food Agriculture*. 81: 813-821.
- James, C. 2000a. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 1999. *ISAAA Briefs No. 17*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 65 pp.
- James, C. 2000b. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2000. *ISAAA Briefs No. 21: Preview*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 8 pp.
- James, C. 1999. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 1999. *ISAAA Briefs No. 12: Preview*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 8 pp.
- James, C. 1998. Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 1998. *ISAAA Briefs No. 8*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 43 pp.
- James, C. 1997a. Global Status of Transgenic Crops in 1997. *ISAAA Briefs No. 5*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 30 pp.
- James, C. 1997b. Progressing Public-Private Sector Partnerships in International Agricultural Research and Development. *ISAAA Briefs No. 4*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 32 pp.

- James, C. and A.F. Krattiger. 1996. Global Review of the Field Testing and Commercialization of Transgenic Plants, 1986 to 1995: The First Decade of Crop Biotechnology. *ISAAA Briefs No. 1*. ISAAA: Ithaca, NY, USA. 31 pp.
- Jarvis, D.I. and T. Hodgkin. 1999. Wild relatives and crop cultivars: Detecting natural introgression and farmer selection of new genetic combinations in agroecosystems. *Mol. Ecol.* 8:S159-S173.
- Jayaraj, S. 1990. The problem of *Helicoverpa armigera* in India and its integrated management. In: *Heliothes Management Proc. of National Workshop*. Coimbatore, India. pp. 1-16.
- JECFA. 2001. (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). Fifty-sixth 172 meeting. Geneva, 6-15 February 2001. <http://www.who.int/pcs/jecfa/jecfa.html>.
- Kalaitzandonakes, N.G. 2000. Agrobiotechnology and competitiveness. *American Journal of Agricultural Economics* 82(5):1224-1233
- Kaplinsky, N., D. Braun, D. Lisch, A. Hay, S. Hake and M. Freeling. 2002. Maize transgene results in Mexico are artifacts. *Nature* 416:601. 11 April 2002.
- Kellerman, T.S., W.F.O. Marasas, P.G. Thiel, W.C.A. Gelberblom, M. Cawood, and J.A.W. Coetzer. 1990. Leukoencephalomalacia in two horses induced by oral dosing of fumonisin B1. *Onderstepoort J. Vet. Res.* 57:269-275.
- Kirsten, J. and M. Gouse. 2003. The adoption of and impact of agricultural biotechnology in South Africa. In: Kalaitzandonakes, N. (ed.). *The Economic and Environmental Impact of Agbiotech: A Global Perspective*. Kluwer Academic Press, Plenum Publishers, New York, USA.
- Kreik, N.N.J., T.S. Kellerman and W.F.O. Marasas. 1981. A comparative study of the toxicity of *Fusarium verticillioides* (*F. moniliforme*) to horses, primates, pigs, sheep, and rats. *Onderstepoort J. Vet. Res.* 48:129-131.
- Kuiper, H.A. and G.A. Kleter. 2000. Environmental and safety aspects associated with the use of transgenic crops. *Proc. IUPAC-TACTRI/COA International Workshop on Pesticides 2000*. Taichung, Taiwan, 3-6 October 2000.
- Labatte, J.M., S. Meusnier, A. Migeon, S. Piry and B. Got. 1997. Natural mortality of European corn borer larvae: Field study and modeling. *J. Econ. Entomol.* 90(3):773-783.
- Levine, E. and H. Oloumi-Sadeghi. 1991. Management of diabroticite rootworms in corn. *Annu. Rev. Entomol.* 36:229-55.
- Li, F.Q., T. Yoshizawa, O. Kawamura, X.Y. Luo, Y.W. Li. 2001. Aflatoxins and fumonisins in corn from the high-incidence area for human hepatocellular carcinoma in Guangxi, China. *J. Agric. Food Chem.* 49:4122-4126.
- Li, M., S. Lu, C. Jin, Y. Wang, M. Wang, S. Cheng and G. Tian. 1980. Experimental studies on the carcinogenicity of funguscontaminated food from Linxian County. In: Gelboin, H.V. (ed.). *Genetic and Environmental Factors in Experimental Human Cancer*. Japan Science Society Press, Tokyo. pp. 139-148.
- Lian, M., Y. Yang, J. Su, T. Huang, Z. Wei, Y. Liang, H. Luo, S. Wang, G. Sun and J. Wang. 2003. Validation of fumonisin biomarkers in highrisk population of liver cancer. *Toxicol. Sci.* 72:241.
- Losey, J.E., L.S. Rayor and M.E. Carter. 1999. Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature* 399:214.
- Louette, D. 1997. Seed exchange among farmers and gene flow among maize varieties in traditional agricultural systems. In: CIMMYT. *Gene Flow Among Maize Landraces, Improved Maize Varieties, and Teosinte: Implications for Transgenic Maize*. CIMMYT, 173 Mexico D.F. pp. 56-66. http://www.cimmyt.org/aBC/Geneflow/geneflowpdf_Engl/contents.htm
- Love, S.L. 2000. When does similar mean the same: A case for relaxing standards of substantial equivalence in genetically modified food crops. *HortScience* 35(5):803- 806.

REFERENCES

- Lozzia, G.C. 1999. Biodiversity and structure of ground beetle assemblages (Coleoptera: Carabidae) in Bt corn and its effects on target insects. *Boll. Zool. Agr. Bachic Ser II* 31:37-58.
- Lozzia, G. C. and I. E. Rigamonti. 1998. Preliminary study on the effects of transgenic maize on non target species. *IOBC Bulletin* 21:171-180.
- Lubulwa A.S.G and J. S. Davis. 1994. Estimating the social costs of the impacts of fungi and aflatoxin in maize and peanuts. In: Highley, E., E.J. Wright, H.J Banks and B.R. Champ (eds.). *Stored Product Protection*. CAB International, U.K. pp. 1017-1042.
- Lundgren, J.A. and R.N. Wiedenmann. 2002. Coleopteran-specific Cry3Bb Toxin from transgenic corn pollen does not affect the fitness of a nontarget species, *Coleomegilla maculata* DeGeer (Coleoptera: Coccinellidae). *Environ. Entomol.* 31(6):1213-1218
- Luttrell, R.G., L. Wan and K. Knighten. 1999. Variation in susceptibility of noctuid (Lepidoptera) larvae attacking cotton and soybean to purified endotoxin proteins and commercial formulations of *Bacillus thuringiensis*. *J. Econ. Entomol.* 92:21-32.
- Mackintosh, S.C., T.B. Stone, S.R. Sims, P.L. Hunst, J.T. Greenplate, P.G. Marrone, F.J. Perlak, D.A. Fischhoff and R.L. Fuchs. 1990. Specificity and efficacy of purified *Bacillus thuringiensis* proteins against agronomically important insects. *J. Invert. Pathol.* 56:258-266.
- Magg, T., A.E. Melchinger, D. Klein and M. Bohn. 2000. Comparison of Bt maize hybrids with their non-transgenic counterparts and commercial varieties for resistance to European corn borer, and for agronomic traits. *Plant Breeding* 120:397-403.
- Manchini, B. 2003. University of Milan. Personal comm, referenced in: Gianessi L. 2003. Plant biotechnology: Potential Impact for Improving Pests Management in European Agriculture - Maize Case Study. NCFAP, Washington, DC, USA
- Manchini, B. and G.C. Lozzia. 2002. First Investigations into the effects of Bt corn crop on nematofauna. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*.
- Marasas, W.F.O. 2001. Discovery and occurrence of the fumonisins. *Environ. Health Perspect.* 109(suppl. 2):239-243.
- Marasas, W.F.O. 1996. Fumonisins: History, worldwide occurrence and impact. In: Jackson, L.S., J.W. DeVries and L.B. Bullerman (eds.). *Fumonisins in Food*. Plenum Press, New York. pp. 1-17.
- Marasas, W.F.O. 1993. Occurrence of *Fusarium moniliforme* and fumonisins in maize in relation to human health. *S. Afr. Med. J.* 83:382-383.
- Marasas, W.F.O., R.L. Riley, K.A. Hendricks, V.L. Stevens, T.W. Sadler, J. Gelineau-van Waes, S.t.A. Missmer, J. Cabrera, O. Torres, W.C.A. Gelderblom, J. Allegood, C. Martínez, J. Maddox, J.D. Miller, L. Starr, M.C. Sullards, A.V. Roman, K.A. Voss, E. Wang and A.H. Merrill, Jr. 2003. Fumonisins disrupt sphingolipid metabolism, folate transport, and neural tube development in embryo culture and *in vivo*: A potential risk factor for human neural tube defects among populations consuming fumonisincontaminated maize. *J. Nutrition* (in press).
- Marasas, W.F.O., T.S. Kellerman, W.C.A. Gelderblom, J.A.W. Coetzer, P.G. Thiel and J.J. Van der Lugt. 1988. Leukoencephalomalacia in a horse induced by fumonisin B1 isolated from *Fusarium moniliforme*. *Onderstepoort J. Vet. Res.* 55:197-203.
- Marra, M.C., P. Pardey and J. Alston. 2002. The pay-offs of agricultural biotechnology: An assessment of the evidence. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, USA.
- Mathur, 1998. Pesticide Industry in India. *Pesticide Information* 23(4):17-22.
- Mathur, S., P.D. Constable, R.M. Eppley, A.L. Waggoner, M.E. Tumbleson and W.M. Haschek. 2001. Fumonisin B1 is hepatotoxic and

- nephrotoxic in milk-fed calves. *Toxicol. Sci.* 60:385-396.
- Metcalf, R.L. and R.A. Metcalf. 1993. *Destructive and Useful Insects: Their Habits and Control (5th edition)*. McGraw-Hill, NY, USA.
- Metz, M. and J. Futterer. 2002. Suspect evidence of transgenic contamination. *Nature* 416:600-601.
- Miller, J.D. 2000. Factors that affect the occurrence of fumonisin. *Environmental Health Perspectives* 109(suppl. 2):321-324.
- Miller, J.D. 1995. Fungi and mycotoxins in grain: implications for stored product research. *J. Stored Product Research* 31:1-6
- Mitchell, P.D. 2002. Yield benefit of corn event MON 863. Faculty Paper Series 02-04. Dept. Agric. Econ., Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Moellenbeck, D.J., M.L. Peters, J.W. Bing, J.R. Rouse, L.S. Higgins, L. Sims, T. Nevshemal, L. Marshall, R.T. Ellis, P.G. Bystrak, B.A. Lang, J.L. Stewart, K. Kouba, B. Sondag, V. Gustafson, K. Nour, D. Xu, J. Swenson, J. Zhang, T. Czapla, G. Schwab, S. Jayne, B.A. Stockhoff, K. Narva, H.E. Schnepf, S.J. Stelman, C. Poutre, M. Koziel and N. Duck. 2001. Insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* protected corn from corn rootworms. *Nat. Biotech.* 19:668-672.
- Morris, M. (ed.). 1998. *Maize Seed Industries in Developing Countries*. Lynne Rinner Publishers, Boulder, Colorado, USA.
- Munkvold, G.P., R.L. Hellmich and L.G. Rice. 1999. Comparison of fumonisin concentration in kernels of transgenic Bt maize hybrids and nontransgenic hybrids. *Plant Dis.* 83:130-138.
- Munkvold, G.P. and A.E. Desjardins. 1997. Fumonisin in maize, can we reduce their occurrence? *Plant Dis.* 81:556-565.
- Narong. 2003. Personal communication. Nida, D., S. Patzer, P. Harvey, R. Stipanovic, R. Wood and R. Fuchs. 1996. Glyphosatetolerant cotton: The composition of the cottonseed is equivalent to that of conventional cottonseed. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44(7):1967-1974.
- Novillo, C., J. Fernandez-Anero and J. Costa. 2003. Personal communication: Results in Spain with varieties of corn derived from the MON 810 genetically protected against borers. NRC. (National Research Council). 2002. *Genetically Modified Pest-Protected Plants: Science and Regulation*. Committee on Genetically Modified Pest-Protected Plants. Washington DC: National Academies Press. 292 pp.
- NRC. (National Research Council). 2000. *The Future Role of Pesticides in US Agriculture*. Committee on the Future Role of Pesticides in US Agriculture. Washington, DC: National Academies Press. 301 pp. Oberhauser, K.S., M.D. Prysby, H.R. Mattila, D.E. Stanley-Horn, M.K. Sears, G. Dively, E. Olson, J.M. Pleasants, W.F. Lam and R.L. Hellmich. 2001. Temporal and spatial overlap between monarch larvae and corn pollen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11913-11918. (10.1073/pnas.211234298).
- Obrycki, J., J.E. Losey, O.R. Taylor and L.C.H. Jesse. 2001. Transgenic insecticidal corn: Beyond insecticidal toxicity to ecological complexity. *BioScience* 51(5):353-361.
- OECD. 2000. Report of the OECD Task Force for the Safety of Novel Foods and Feeds. OECD, Okinawa, Japan. http://www.oecd.org/subject/biotech/report_taskforce.pdf
- Oehme, F.W. and J.A. Pickrell. 2003. Genetically engineered corn rootworm resistance: Potential for reduction of human health effects from pesticides. *Biomedical and Environmental Sciences* 16:17-28.
- Oerke, E.C. 2002. Crop Losses due to pests in major crops. In: CAB International. *Crop Protection Compendium 2002. Economic Impact*. CAB International, Wallingford, UK. Onorato, G. and M. Snidaro. 1993. Nuovi orientamenti nella lotta alla piralide del mais. (New directions in the control of the maize pest *Ostrinia nubilalis*). *Lé Informatore Agrario* 49(28):59-66.

REFERENCES

- Orr, D.B. and D.L. Landis. 1997. Oviposition of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) and impact on natural enemy populations in transgenic versus isogenic corn. *J. Econ. Entomol.* 90:905-909.
- Ortman E.E., B.D Barry, L.L. Buschman, D.D. Calvin, J. Carpenter, G.P. Dively, J.E. Foster, B.W. Fuller, R.L. Hellmich, R.A. Higgins, T.E. Hunt, G.P. Munkvold, K.R. Ostlie, M.E. Rice, R.T. Roush, M.K. Sears, A.M. Shelton, B.D. Siegfried, P.E. Sloderbeck, K.L. Steffey, F.T. Turdin and J.L. Wedberg. 2001. Transgenic insecticidal corn: Agronomic and ecological rationale for Its Use. Letter to the Editor. *BioScience* 51(11):900-903.
- Osweller, G.D., P.F. Ross, T. M. Wilson, P.E. Nelson, S.T. Witte, T.L. Carson, L.G. Rice and H.A. Nelson. 1992. Characterization of an epizootic of pulmonary edema in swine associated with fumonisin in corn screenings. *J. Vet. Diagn. Invest.* 4:53-59.
- Otsuki, T., J.S. Wilson and M. Sewadeh. 2001. What price precaution? European harmonization of aflatoxin regulations and African groundnut exports. *Eur. Rev. Agri. Economics* 28:263-283.
- Persley, G.J. 1990. *Beyond Mendel's Garden: Biotechnology in the Service of World Agriculture*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 380-397
- Pew Initiative on Food and Biotechnology. 2003. US v EU - An examination of the trade issues surrounding genetically modified food. August 2003. <http://www.pewagbiotech.org/resources/issuebriefs/europe.pdf>
- Pietri, A. and G. Piva. 2000. Occurrence and control of mycotoxins in maize grown in Italy. In: Piva, G. and F. Masoero (eds.). *Proceedings of the 6th International Feed Conference, Food Safety: Current Situation and Perspectives in the European Community*. Piacenza, Italy, 27-28 November 2000. pp. 226-236.
- Pilcher, C.D., M.E. Rice, R.A. Higgins, K.L. Steffey, R.L. Hellmich, J. Witkowski, D. Calvin, K.R. Ostlie and M. Gray. 2002. Biotechnology and the European corn borer: Measuring historical farmer perceptions and adoption of transgenic Bt corn as a pest management strategy. *J. Econ. Entomol.* 95(5):878-892.
- Pilcher, C., M. Rice, J. Obrycki and L. Lewis. 1997. Field and laboratory evaluation of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn on secondary Lepidopteran pests (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 90:669-678.
- Plantenziektenkundige Dienst. 2003. Diabrotica aangetroffen nabij Schipol. Wageningen, Netherlands. Press release, August 2003.
- Pleasant, J.M., R.L. Hellmich, G.P. Dively, M.K. Sears, D.E. Stanley-Horn, H.R. Mattila, J.E. Foster, T.L. Clark and G.D. Jones. 2001. Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11919-11924. (10.1073/pnas.211287498)
- Quist, D. and I.H. Chapela. 2002. Suspect evidence of transgenic contamination/Maize transgene results in Mexico are artifacts. *Nature* 416:602. 11 April 2002.
- Quist, D. and I.H. Chapela. 2001. Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature* 414:541-543. 29 November 2001.
- Raps, A., J. Kehr, P. Gugerli, W.J. Moar, F. Bigler and A. Hilbeck. 2001. Immunological analysis of phloem sap of *Bacillus thuringiensis* corn and of the nontarget herbivore *Rhopalosiphum padi* (Homoptera: Aphididae) for the presence of CryIAb. *Molecular Ecology* 10:525-533.
- Rheeder, J.P., W.F.O. Marasas, P.G. Thiel, E.W. Sydenham, G.S. Shephard and D.J.V. Schalkwyk. 1992. *Fusarium moniliforme* and fumonisins in corn in relation to human esophageal cancer in Transkei. *Phytopathology* 82:353-357.
- Rice, M.E. 2003. Transgenic Bt corn for management of corn rootworms: Assessing potential agronomic, economic and environmental benefits. Submitted for publication to *Plant Health Progress*.
- Rogan, G.J., J.T. Bookout, D.R. Duncan, R.L. Fuchs, P.B. Lavrik, S.L. Love, M. Mueth, T. Olson, E.D.

- Owens P.J. Raymond, and J. Zalewski. 2000. Compositional analysis of tubers from insect and virus resistant potato plants. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 48:5936-5945.
- Ross, P.F., A.E. Ledet, D.L. Owens, L.G. Rice, H.A. Nelson, G.D. Osweiler and T.M. Wilson. 1993. Experimental equine leukoencephalomalacia, toxic hepatitis, and encephalopathy caused by corn naturally contaminated with fumonisins. *J. Vet. Diagn. Invest.* 5:69-74.
- Ross, P.F., P.E. Nelson, J.L. Richard, G.D. Osweiler, L.R. Rice, R.D. Plattner and T.M. Wilson. 1990. Production of fumonisins by *Fusarium moniliforme* and *Fusarium proliferatum* isolates associated with equine leukoencephalomalacia and a pulmonary edema syndrome in swine. *Appl. Environ. Microbiol.* 56:3225-3226.
- Royal Society <http://www.royalsociety.org/template/press/showpresspage.cfm?file=447.txt>
- Sadler, T.W., A.H. Merrill, V.L. Stevens, M.C. Sullards, E. Wang and P. Wang. 2002. Prevention of fumonisin B1-induced neural tube defects by folic acid. *Teratology* 66(4):169-176.
- Sanders, P., T. Lee, M. Groth, J. Astwood and R. Fuchs. 1998. Safety Assessment of Insect-Protected Corn. In: Thomas, J.A. (ed.). *Biotechnology and Safety Assessment, 2nd edition*. Taylor & Francis Ltd., London, UK. pp. 241-256.
- SCF(Scientific Committee on Food). 2003. Updated opinion of the Scientific Committee on Food on Fumonisin B1, B2, B3. European Commission. Health & Consumer Protection Directorate-General SCF/CS/CNTM/MYC/28 (4 April 2003).
- Scudamore, D.A. and S. Patel. 2000. Survey for aflatoxin, ochratoxin A, zearalenone and fumonisins in maize imported into the United Kingdom. *Food Addit. Contam.* 17:407-416.
- Sears, M.K., R.L. Hellmich, D.E. Stanley-Horn, K.S. Oberhauser, J.M. Pleasants, H.R. Mattila, B.D. Siegfried and G.P. Dively. 2001. Impact of *Bt* corn pollen on monarch butterfly populations: A risk assessment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11937-11942. (10.1073/pnas.211329998)
- Sedlacek, J.D., S.R. Komaravalli, A.M. Hanley, B.D. Price and P.M. Davis. 2001. Life history attributes of Indian meal moth (Lepidoptera: Pyralidae) and Angoumis grain moth (Lepidoptera: Gelechiidae) reared on transgenic corn kernels. *J. Econ. Entomol.* 94:586-592.
- Shelton, A.M. and M.K. Sears. 2001. The Monarch butterfly controversy: Scientific interpretations of a phenomenon. *The Plant Journal* 27(6):483-488.
- Shelton, A.M., J-Z. Zhao and R.T. Rush. 2002. Economic, ecological, food safety and social consequences of the deployment of Bt transgenic plants. *Ann. Rev. Entomol.* 47:845-881.
- Shephard, G.S., P.G. Thiel, S. Stockenstrom and E.W. Sydenham. 1996. Worldwide survey of fumonisin contamination of corn and cornbased products. *J. AOAC Int.* 79:671-687.
- Sidhu, R.S., B.G. Hammond, R.L. Fuchs, J. Mutz, L.R. Holden and G.B. Olsen. 2000. Glyphosate-tolerant corn: The composition and feeding value of grain from glyphosetolerant corn is equivalent to that of conventional corn (*Zea mays* L.). *J. Agric. Food Chem.* 48(6):2305-2312.
- Smalla, K., S. Borin, H. Heuer, F. Gebhard, J. Dirk van Elsas and K. Nielsen. 2000. Horizontal transfer of antibiotic resistance genes from transgenic plants to bacteria—Are there new data to fuel the debate? In: Fairbairn, C., G. Scoles and A. McHughen (eds.). *Proceedings of the 6th International Symposium on the Biosafety of Genetically Modified Organisms*. University Extension Press, Saskatchewan, Canada, <http://www.agbios.com/articles/2000246-A.htm>
- Smith, B.D. 1995. *The Emergence of Agriculture*. Scientific American Library, W.H. Freeman, New York. Snow, A.A., D. Pilson, L.H. Rieseberg, M.J. Paulsen, N. Pleskac, M.R. Reagon, D.E. Wolf and S.M. Selbo. 2002. A Bt transgenic reduces herbivory and enhances fecundity in wild flowers. *Ecological Applications* 13(2):279-286.
- Sobek, E.A. and G.P. Munkvold. 1999. European corn borer (Lepidoptera: Pynelidae) larvae as vectors of *Fusarium moniliforme*, causing kernel

REFERENCES

- rot and symptomless infection of maize kernels. *J. Econ. Entomol.* 92:503–509.
- Stanley-Horn, D.E., G.P. Dively, R.L. Hellmich, H.R. Mattila, M.K. Sears, R. Rose, L.C. H. Jesse, J.E. Losey, J.J. Obrycki and L. Lewis. 2001. Assessing the impact of Cry1Ab-expressing corn pollen on monarch butterfly larvae in field studies. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11931-11936. (10.1073/pnas.211277798).
- Suett, D.L. and A. Walker. 1988. Accelerated degradation of soil-applied pesticides - implications for UK horticulture. *Aspects Applied Biol.* 17:213-222.
- Sydenham, E.W., P.G. Thiel, W.F.O. Marasas, G.S. Shephard, D.J.V. Schalkwyk and K.R. Koch. 1990. Natural occurrence of some *Fusarium* mycotoxins in corn from low and high esophageal cancer prevalence areas of the Transkei, South Africa. *J. Agric. Food Chem.* 38:1900-1903
- Tabashnik, B.E., Y. Carriere, T.J. Demneh, S. Morin, M.S. Sisterson, R.T. Roush, A.M. Shelton and J.Z. Zhao. 2003. Insect resistance to transgenic Bt crops: Lessons from the laboratory and field. *J. Econ. Entomol.* (in press).
- Taylor, N., R. Fuchs, J. MacDonald, A. Shariff and S. Padgett. 1999. Compositional analysis of glyphosate-tolerant soybeans treated with glyphosate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47(10): 4469-4473.
- United Nations. <http://www.fao.org/english/newsroom/news/2002/8660-en.html>
- USDA/NAAS. 2003. USDA/NAAS Fact Finders for Agriculture Crop Acreage and Biotech Crops Data released 30 June 2003. Washington, DC, USA.
- USDA. 2003. Economic Research Service FATUS Commodity Aggregations USDA. 1975. Cooperative Economic Insect Report APHIS. Vol. 25, No. 32 August 1975.
- USEPA. 2001. Office of Pesticide Programs, Biopesticides and Pollution Prevention Division. Biopesticides registration action document; revised risks and benefits sections; *Bacillus thuringiensis* Plant-Pesticides. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA. 2000. Office of Pesticide Programs, Biopesticides and Pollution Prevention Division. Biopesticides registration document; preliminary risks and benefits sections; *Bacillus thuringiensis* plantpesticides.
- US Environmental Protection Agency, Washington, DC. USEPA. 1995. Pesticide fact sheet for *Bacillus thuringiensis* susp. kurstaki CryI(A)b deltaendotoxin and the genetic material necessary for the production (plasmid vector pCIB4431) in corn. EPA publication number EPA731-F-95-004.
- Van der Westhuizen, L., G.S. Shepard, V.M. Scussel, L.L.F. Costa, H.F. Vismer, J.P. Rheeder and W.F.O. Marasas. 2003. Fumonisin contamination and *Fusarium* incidence in corn from Santa Catarina, Brazil. *J. Agric. Food Chem.* 51(18):5574-5578.
- Venette, R.C., J.C. Luhman and W.D. Hutchison. 2000. Survivorship of field-collected European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) larvae and its impact on estimates of resistance to *Bacillus thuringiensis* Berliner. *J. Entomol. Sci.* 35:208-212.
- Visconti, A. and B. Doko. 1994. Survey of fumonisin production by *Fusarium* isolated from cereals in Europe. *J. AOAC Int.* 77:546-550.
- Voss, K.A., R.T. Riley, W.P. Norred, C.W. Bacon, F.I. Meredith, P.C. Howard, R.D. Plattner, T.F.X. Collins, D.K. Hansen and J.K. Porter. 2001. An overview of rodent toxicities: Liver and kidney effects of fumonisins and *Fusarium moniliforme*. *Environ. Hlth. Perspect.* 109(suppl. 2):259-266.
- Wang, G. 2003. Personal communication.
- Wang, J., S. Wang, J. Su, T. Huang, X. Hu, J. Yu, Z. Wei, Y. Liang, Y. Liu, H. Luo and G. Sun. 2003. Food contamination of Fumonisin B1 in high-risk area of esophageal and liver cancer. *Toxicol. Sci.* 72:188.

- Williams, W.P., P.M. Buckley, J.B. Sagers, and J.A. Hanten. 1998. Evaluation of transgenic corn for resistance to corn earworm (Lepidoptera: Noctuidae), and southwestern corn borer (Lepidoptera: Crambidae) in a laboratory bioassay. *J. Agric. Entomol.* 15:105-112.
- Wilson, T.M., P.F. Ross, D.L. Owens, L.G. Rice, S.A. Green, S.J. Jenkins and H.A. Nelson. 1992. Experimental reproduction of ELEM –A study to determine the minimum toxic dose in ponies. *Mycopathologia* 117:115-120.
- Wolt J.D., R.K.D. Peterson, P. Bystrak and T. Meade. 2003. A screening approach for nontarget insect risk assessment: Transgenic Bt corn pollen and the monarch butterfly (Lepidoptera: Danidae). *Environmental Entomology* 32(2):237-246
- Wood Mackenzie Agrochemical Services. 2003. Personal communication.
- Wood Mackenzie Agrochemical Services. 2002. Personal communication.
- Wood Mackenzie Agrochemical Services. 2001. Personal communication.
- World Bank. 2003. <http://www.worldbank.org/prospects/pinksheets/index.htm>
- Wraight, C.L., A.R. Zangerl, M.J. Carroll and M.R. Berenbaum. 2000. Absence of toxicity of *Bacillus thuringiensis* pollen to black swallowtails under field conditions. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 97:7700-7703.
- Wu, F. 2003. Explaining consumer resistance to genetically modified corn: An analysis of the distribution of benefits and risks. *Risk Analysis, Best Paper Issue.* (in press).
- Zangerl, A.R., D. McKenna, C.L. Wraight, M. Carroll, P. Ficarello, R. Warner and M.R. Berenbaum. 2001. Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and black swallowtail caterpillars under field conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98(21):11908-11912. (10.1073/pnas.171315698).
- Zwahlen, C., W. Nentwig, F. Bigler and A. Hilbeck. 2000. Tritrophic interaction of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn, *Anaphothrips obscura* (Thysanoptera: Thripidae) and the predator *Orius majusculus* (Heteroptera: Anthocoridae). *Environ. Entomol.* 29:846.850.

Pour toute information sur l'ISAAA, contacter le Centre le plus proche de vous:

ISAAA *Ameri*Center
417 Bradfield Hall
Cornell University
Ithaca NY 14853, U.S.A.

ISAAA *Afri*Center
c/o CIP
PO 25171
Nairobi
Kenya

ISAAA *SEAsia*Center
c/o IRRI
DAPO Box 7777
Metro Manila
Philippines