L'adoption des plantes génétiquement modifiées par les pays en développement

Claudine Franche

Directrice de Recherche

Institut de Recherche pour le Développement

claudine.franche@ird.fr

Mise en ligne : 12 janvier 2014

Résumé

Lors de l'année 2012, les surfaces cultivées en plantes génétiquement modifiées (PGM) dans le monde ont atteint 170,3 millions d'hectares et, pour la première année, les surfaces dans les pays industrialisés ont été inférieures à celles des pays en développement. Cotonnier, soja et maïs tolérants à des herbicides et/ou résistants à des insectes, constituent actuellement l'essentiel des variétés adoptées par les agriculteurs du Sud, mais d'ambitieux programmes de recherche devraient conduire, dans les prochaines années, à une diversification des applications. Comme le montrent des études récentes, l'adoption rapide des cultures GM dans les pays en développement est liée à de multiples facteurs, d'ordre agronomique, environnemental et économique. Suscitant toujours des interrogations et des controverses importantes dans de nombreux pays, les cultures GM pourraient cependant être l'une des solutions pour contribuer à la sécurité alimentaire dans les pays en voie de développement.

Alors que les plantes génétiquement modifiées (PGM) suscitent toujours autant de polémiques en Europe et qu'il n'y a plus d'essai en plein champ en France en 2013 (voir ogm.gouv.fr), les surfaces cultivées en PGM dans les pays en développement continuent de progresser et les projets de recherche en cours dans les laboratoires se diversifient. Dans ce document, un état des lieux des cultures génétiquement modifiées dans les pays du sud est dressé, tentant, à travers des données parfois contradictoires, de comprendre les facteurs qui guident l'adoption de ces plantes par les petits cultivateurs. Un intérêt particulier est porté à l'Afrique et à l'Asie où sont situées une majorité des populations souffrant de malnutrition, de pauvreté, de manque d'instruction et de structures publiques de conseil et d'expertise.

Surfaces cultivées en 2012 en Amérique latine, Asie et Afrique

Selon l'ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications), les surfaces couvertes par les plantes transgéniques cultivées à des fins commerciales ont été, pour le monde entier en 2012, de 170,3 millions d'hectares, ce qui représente une augmentation de 10,3 millions d'hectares (soit 6%) par rapport à 2011. Comme le laissait présager en 2011 l'analyse comparative des surfaces cultivées en plantes génétiquement modifées (PGM) et de leur progression à l'échelle internationale, les pays en développement ont, avec 88,5 millions d'ha en cultures génétiquement modifiées (GM), dépassé pour la première fois en 2012 les surfaces présentes dans les pays industrialisés (81,8 millions d'ha) (Figure 1) (James, 2012).

Parmi les 28 pays qui ont réalisé ces cultures GM, 20 sont des pays en développement, et 8 des pays industrialisés. Les pays les plus gros cultivateurs sont le Brésil et l'Argentine pour l'Amérique latine, la Chine et l'Inde pour l'Asie, et l'Afrique du Sud pour le continent africain (Tableau 1). Le pays dans lequel l'augmentation de surface la plus conséquente a été observée est le Brésil, avec une augmentation des surfaces de 21% entre 2011 et 2012. Il faut noter que, bien que 52% des surfaces GM soient cultivées dans 20 pays du Sud, l'essentiel de ces surfaces est situé en Amérique latine et appartiennent à de grands propriétaires.

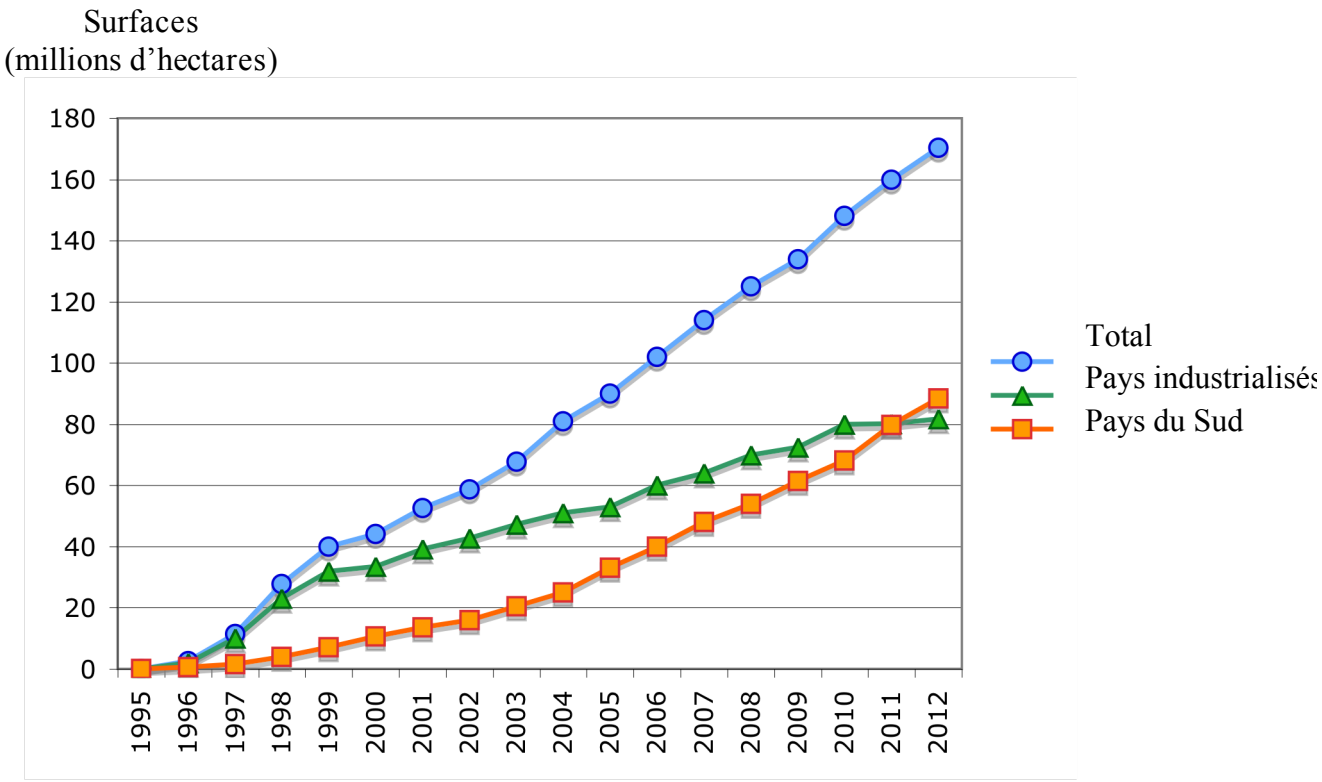

Figure 1 *: Evolution des surfaces en plantes transgéniques cultivées à des fins commerciales. D'après James (2012).*

Pour la première année, le Soudan et Cuba ont cultivé en 2012 des PGM. Le Soudan, avec la culture de 20 000 hectares de cotonniers résistant à des insectes (communément appelés « cotonniers Bt » en référence à la présence d'un gène de toxine de *Bacillus thuringiensis*), est donc le quatrième pays d'Afrique impliqué dans ces cultures, après l'Afrique du Sud, l'Egypte et le Burkina-Faso. Les Cubains ont quant à eux planté 3000 ha de maïs GM, exprimant un gène Bt de résistance à *Spodoptera frugiperda*, un lépidoptère originaire du continent américain, responsable de pertes de récolte importantes sur maïs. L'objectif affiché par Cuba est de réaliser, à travers ces maïs GM, des cultures « écologiquement durables », sans ajout de pesticide.

Toujours selon l'ISAAA, 17,3 millions d'agriculteurs, soit 0,6 million d'agriculteurs supplémentaires par rapport à 2011, ont cultivé des plantes GM. Plus de 90% d'entre eux sont de petits cultivateurs de pays en développement. On compte par exemple, tant en Chine qu'en Inde, environ 7,2 millions d'agriculteurs impliqués dans ces cultures. A l'échelle mondiale, 15 millions de petits agriculteurs cultivent du cotonnier Bt, en particulier en Inde, Chine et Afrique du Sud.

Les bénéfices économiques générés par les cultures GM auraient été de 10,1 milliards de dollars US dans les pays en développement et de 9,6 milliards des pays industrialisés (selon James, 2012).

Plantes transgéniques cultivées au Sud et gènes d'intérêt

Jusqu'à présent, le maïs, le soja et le cotonnier représentent l'essentiel des surfaces cultivées dans les pays en développement (Tableau 1). Ces plantes expriment pour la plupart des gènes de tolérance aux herbicides (principalement le glyphosate), de résistance à des insectes (stratégie Bt, détaillée dans la section suivante), ou encore un empilement de ces nouveaux caractères. Dans le cadre de partenariats publics-privés assurant l'accès aux gènes et aux techniques de transformation génétique, les gènes d'intérêt ont pu être introgressés dans des variétés locales de maïs et de cotonniers adaptées aux besoins des agriculteurs du Sud. Au-delà de ces plantes, on assiste actuellement à une diversification des applications, certaines arrivant en phase commerciale, les plus nombreuses étant en phase d'évaluation au champ, parfois depuis plusieurs années, soit en

raison de problèmes de législation, d'acceptabilité, ou encore des coûts liés aux procédures d'évaluation et de commercialisation.

Tableau 1 *: Superficies cultivées en 2012 dans les pays en développement.*

Pays (rang)	Superficies en millions d'hectares	% augmentation de 2011à 2012	Nature des cultures GM
Amérique latine			
Brésil (2)	36,6	+21%	Soja HT, cotonnier Bt, maïs Bt
Argentine (3)	23,9	+1%	Soja HT, cotonnier Bt/HT/Bt-HT, maïs Bt/HT/Bt-HT
Paraguay (7)	3,4	+21%	Soja HT, maïs Bt/HT, cotonnier Bt/HT
Uruguay (10)	1,4	+8%	Soja HT, maïs Bt/HT
Bolivie (11)	1	+11%	Soja HT
Mexique (16)	0,2	+100%	Cotonnier Bt, soja HT
Chili (18)	<0,1	-	Soja, maïs, colza
Colombie (19)	<0,1	+33%	Cotonnier Bt/HT et HT
Honduras (20)	<0,1	-	Maïs Bt/HT et HT
Cuba (24)	<0,1		Maïs
Costa Rica (26)	<0,1		Cotonnier Bt, soja HT
Asie			
Inde (5)	10,8	+2%	Cotonnier Bt
Chine (6)	4	+3%	Cotonnier Bt, peuplier Bt, papayer PRSV, poivron VR, tomate VR
Pakistan (9)	2,8	+8%	Cotonnier Bt
Philippines (12)	0,8	+16%	Maïs Bt/HT/Bt-HT
Myanmar (15)	0,3	+3%	Cotonnier Bt
Afrique			
Afrique du Sud (8)	2,9	+26%	Cotonnier Bt/HT/HT-Bt, maïs Bt, soja HT
Burkina Faso (14)	0,3	-	Cotonnier Bt
Soudan (21)	<0,1	-	Cotonnier Bt
Egypte (25)	<0,1	-	Maïs

D'après James (2012, 2013).

Le rang indique le classement en fonction des surfaces cultivées en 2012 dans les 28 pays commercialisant des plantes transgéniques.

HT : tolérance aux hercides, Bt : résistance aux insectes par introduction d'un ou plusieurs gènes de toxine de Bacillus thuringiensis (Bt), PRSV : « papaya ringspot virus », VR : résistance aux virus.

- : information non disponible.

** Plantes transgéniques résistantes aux virus*

Parmi les applications couvrant de moindres surfaces, on peut noter les plantes transgéniques résistantes aux infections virales. L'exemple le plus ancien concerne les papayers résistants au virus des taches en anneaux (« papaya ring-spot virus », PRSV), obtenus par introduction d'un gène de protéine de capside du virus. Le PRSV appartient au groupe des potyvirus ; transmis par des aphides, il est considéré comme l'un des principaux facteurs limitant la production commerciale de papayes à l'échelle internationale. Un partenariat entre l'Université de Cornell (Etats Unis) et l'Université d'Hawaii a abouti à la commercialisation, en 2008, des premières variétés de papayes transgéniques Rainbow et Sunup à Hawaii. Cette stratégie a été ensuite reprise par plusieurs pays, dont la Chine, le Brésil, le Venezuela, la Jamaïque et la Thaïlande (Gonsalves, 2006), mais seule la Chine a autorisé les plantations de papayers transgéniques. Il est intéressant de noter, qu'au-delà de la lutte contre les infections virales, le génome du papayer transgénique Sunup a été entièrement séquencé en 2008, avec pour objectif d'en favoriser l'acceptabilité, et contribuant également à faire de cet arbre fruitier un modèle (Ming et al., 2008).

Un exemple plus récent de plante transgénique résistante aux virus est fourni par le Brésil qui vient d'autoriser la culture d'un haricot (*Phaseolus vulgaris*) GM résistant au virus de la mosaïque jaune du haricot (« bean golden mosaic virus » ou BGMV) (Aragao et al., 2013). En Amérique latine et en particulier au Brésil, le haricot est la source principale de fer et de protéines. Le BGMV est un géminivirus transmis par un hémiptère, *Bemisia tabaci* ou aleurode du tabac. Il est responsable de la maladie la plus dévastatrice du haricot en Amérique latine, avec des pertes enregistrées au Brésil qui peuvent atteindre 40% à 100%. L'EMBRAPA (« Entreprise brésilienne de recherche agronomique et d'élevage»), institut public ayant un rôle moteur dans le développement de nouvelles variétés GM au Brésil, a utilisé une approche par interférence de l'ARN (ARNi) pour bloquer avec succès la réplication du virus dans le haricot (Bonfin et al., 2007).

** Riz transgéniques en Chine*

Pour la Chine, une préoccupation majeure est le développement de stratégies permettant une augmentation de la production de riz de 25% d'ici 2020, tout en devant faire face à une réduction des terres agricoles liée à l'expansion des villes et à une désertification des campagnes. A côté des techniques classiques d'amélioration génétique, la Chine a opté pour le développement de riz GM, avec un important soutien du gouvernement. Les priorités pour cette céréale sont d'augmenter les rendements, la résistance aux maladies et aux ravageurs, la tolérance aux stress abiotiques, et d'améliorer les propriétés nutritionnelles, tout en diminuant les coûts de production (Demont et Stein, 2013).

Actuellement, il existe une grande variété de riz GM, les variétés en phase de développement contenant principalement des gènes de résistance aux insectes, de tolérance aux herbicides, à la sécheresse et/ou à la salinité, et des séquences visant à augmenter le contenu en ß-carotène, en fer et en folate (pour revue Kathuria et al., 2007). Cependant, bien que plusieurs techniques de transformation génétique du riz aient été mises au point dans les années 90, il n'y a toujours pas de riz transgénique cultivé à grande échelle en Asie, le bénéfice apporté par ces cultures n'étant pas toujours établi par rapport aux variétés traditionnelles. Par ailleurs, le risque de flux de gènes à des formes sauvages apparentées représente une incertitude majeure qui suscite des études complémentaires (Liu et al., 2012). Entre 2002 et 2004, des riz Bt résistants au foreur des tiges *Scirpophaga incertulas* ont été testés dans 17 villages en Chine, mettant en évidence des augmentations moyennes de rendement allant de 0 à 12%, associées à une réduction des insecticides de 50 à 90% (Huang et al., 2010). En revanche, les riz GM tolérants à la sécheresse et à la salinité n'auraient pas conduit à des rendements supérieurs aux variétés obtenues par des techniques d'amélioration génétique classique. Les décisions prises par la Chine vis-à-vis des

variétés GM auront sans aucun doute un impact considérable sur l'adoption de ces variétés par le continent asiatique.

** Projets d'amélioration nutritionnelle (« biofortification »)*

Environ 900 millions d'êtres humains souffrent de malnutrition (FAO, 2012), et beaucoup d'autres souffrent de déficits nutritionnels spécifiques, notamment en fer, zinc et cuivre, souvent liés à un apport trop faible en micronutriments (pour revue, White et Broadley, 2009). Si la famine est particulièrement marquée en Afrique subsaharienne, la malnutrition affecte également durement l'Asie. Paradoxalement, 50% des personnes souffrant de malnutrition sont des paysans des pays en développement. Ces déficiences sont le résultat de sols pauvres, et/ou de la consommation de plantes avec de faibles concentrations en éléments nutritifs, non contrebalancée par la consommation de poisson ou de viande, ainsi que l'abandon de cultures légumières mineures au profit de cultures de rente destinées à l'exportation.

Il existe diverses approches possibles pour lutter contre la malnutrition, comme la diversification du régime alimentaire, l'apport de suppléments alimentaires, ou encore par l'augmentation du contenu nutrionnel des végétaux constituant le régime alimentaire de base. Les plantes ciblées pour les programmes de « biofortification » sont celles qui sont à la base de l'alimentation des pays concernés, à savoir le riz, le blé, le maïs, le sorgho, les haricots et le manioc. Plusieurs plantes ont été modifiées génétiquement pour améliorer la concentration en ß-carotène et tenter de pallier la carence en vitamine A. C'est le cas par exemple du riz doré, du maïs, du sorgho et des pommes de terre. D'autres exemples de biofortification viennent de l'introduction de protéines riches en résidus cystéine et méthionine. Des plantes transgéniques en contenu amélioré en fer, zinc et calcium ont également été produites, mais ne sont pas encore commercialisées (Beyer, 2010).

Le cas du riz doré illustre les difficultés du passage de la démonstration de faisabilité technique (« proof of concept») d'un laboratoire public à l'introduction d'une plante transgénique auprès de la population. Le riz doré, grâce à l'introduction de trois gènes codant respectivement pour une phytoène synthase et une lycopène cyclase d'origine végétale, ainsi qu'une phytoène désaturase d'origine bactérienne, présente une coloration jaune de l'albumen qui traduit la présence de ß-carotène. Ce dernier est un précurseur de la vitamine A, dont la carence est responsable de cécité infantile affectant plus de 500 000 enfants chaque année. Le premier riz doré a été produit en 1999 (Ye et al., 2000), puis optimisé en 2005 avec la collaboration de Syngenta, aboutissant à une teneur en ß-carotène de 37 µg par gramme de riz (Paine et al., 2005). Si ce projet à visée humanitaire a reçu une perception positive de la communauté scientifique, et vu son intérêt relayé par les médias, il a également rencontré des obstacles (Potrykus, 2010) et provoqué une vive opposition des lobbies anti-OGM (Potrykus, 2010). Si tout avait suivi un cours « normal », il était attendu que ce riz soit utilisé en Asie dès 2002. Plus de dix ans se sont écoulés, et le riz doré devrait parvenir seulement en 2013-2014 dans les pays en développement. Parmi les plus grands obstacles, il faut noter les difficultés d'obtention de crédits permettant d'aborder la phase de développement, le climat hostile autour des OGM n'ayant pas facilité les démarches. Le premier essai au champ a été réalisé en 2004 aux Etats Unis, en Louisiane, tandis que celui dans un pays du sud n'a pu être organisé qu'en 2008. L'adoption attendue de ce riz par les Philippines devrait être suivie par la Chine, le Vietnam et le Bangladesh. Ces graines, conçues dans un cadre humanitaire, devraient être cédées sans surcoût aux riziculteurs.

** Des projets diversifiés en phase de développement*

Certains pays comme le Brésil, la Chine, l'Inde ou encore l'Afrique du Sud reçoivent un fort soutien de leur gouvernement pour la mise en place de structures nationales de recherche permettant le développement des biotechnologies végétales. On peut aussi noter l'investissement des Centres internationaux membres du consortium CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) et de fondations caritatives (Bill & Melinda Gates, Buffet) pour l'application de ces

technologies à des plantes intéressant plus spécifiquement les pays du sud (Okosu, 2009 ; Gates, 2012). Certains de ces projets font l'objet de partenariats publics-privés et de partenariats Sud-Sud. Le niébé, le manioc, le mil, le millet, le bananier plantain et le sorgho font partie des plantes qui bénéficient actuellement des techniques de transgenèse, l'introduction de gènes conférant une résistance aux stress biotiques et abiotiques restant des objectifs majeurs.

Bien que la priorité de la majorité des pays en développement soit bien sûr de faire face à une population croissante et d'augmenter la production agricole, au moins deux pays du Sud sont actuellement impliqués dans des programmes à visées environnementale ou industrielle par une approche de transgenèse. Ainsi la Chine est le premier pays à avoir réalisé des plantations de peupliers Bt près de Pékin. Le second pays qui développe de très nombreux essais au champ est le Brésil, avec des projets visant l'amélioration génétique de l'Eucalyptus (croissance, stress biotiques et abiotiques, modification de la voie de biosynthèse de la lignine pour la production de pâte à papier ou de biotéthanol).

Une adoption rapide des cotonniers « Bt » en Chine, Inde et Afrique du Sud

Si certaines plantes transgéniques comme le riz doré ont connu ou connaissent encore des difficultés pour passer du stade de l'essai au champ à celui d'une culture commerciale, l'adoption des cotonniers Bt a été rapide dans les pays du sud. Les premiers cotonniers Bt, commercialisés sous le nom de Bollgard®, ont été produits à la fin des années 80 par Monsanto. Grâce à l'expression du gène de toxine *cry1Ac* de *B. thuringiensis*, ils possédent une protection contre plusieurs ravageurs, *Helicoverpa armigera, Earias vitella* et *Pectinophora gossypiella*. La commercialisation de la variété Bollgard® a débuté en 1996 aux Etats Unis et en 1997 en Chine. Très rapidement, 13 autres pays, dont l'Inde et l'Afrique du Sud, ont adopté ces cotonniers. Bollgard®II est une version améliorée contenant deux gènes de résistance, *cry1Ac* et *cry2Ab*, conférant un spectre de résistance plus large et plus durable. Approuvé en 2002, il a été cultivé à partir de 2003. Depuis, d'autres variétés contenant des empilages de gènes, en particulier un gène de tolérance à l'herbicide Roundup, ont été développées.

- *Chine*

En Asie, *Helicoverpa armigera* (ver de la capsule du cotonnier) est l'un des lépidoptères les plus dévastateurs des cultures agricoles. Quatre générations d'insectes se succèdent par an dans le Nord de la Chine, la première génération infestant principalement le blé, et les générations suivantes ravageant le cotonnier, le maïs, l'arachide et le soja. Des infestations par ce lépidoptère étaient fréquentes en Chine au début des années 90. En 1991, le Centre de recherche en biotechnologie du CAAS (« China Academy of Agricultural Sciences ») a initié un important programme visant à développer des variétés de cotonniers Bt qui contrôleraient *H. armigera*. Les premiers cotonniers Bt ont été obtenus en 1993, commercialisés en 1997, et dès 2001, ils étaient plantés à grande échelle dans le nord et l'est de la Chine, permettant le plus souvent une augmentation des rendements, une diminution de l'usage des pesticides et des revenus accrus pour les cultivateurs (Wu et al., 2008). Des partenariats avec Monsanto et le CAAS ont ensuite permis de diversifier le nombre de variétés et d'améliorer les performances dans la lutte contre les ravageurs. Un suivi sur les années 1992 à 2007, dans les provinces de Hebei, Shandong, Jiangsu, Shanxi, Henan et Anhui, a mis en évidence une diminution régulière dans les populations de *H. armigera*, associée à la présence des plantations de cotonniers Bt. Ce phénomène a été observé non seulement sur cotonnier, mais a également bénéficié aux cultures avoisinantes. Le coût de production est globalement réduit de 20% à 33%, selon la variété et la localisation des champs, l'impact positif étant généralement plus marqué pour les cultivateurs les plus pauvres possédant des terres de moins de 1 hectare.

- *Inde*

Après la Chine, l'Inde est le plus gros producteur de coton. Avant l'introduction des plantes Bt, les pertes résultant des vers de la capsule atteignaient 20 à 50% de la production indienne. Les

cotonniers Bollgard® ont été les premières plantes transgéniques plantées en Inde en 2002. Des accords entre Monsanto et la firme indienne d'agro-biotechnologie Mahyco ont permis un transfert de la technologie Bt à des germplasmes locaux de cotonniers. Les paysans indiens ont massivement adopté cette culture ; en 2012, les cotonniers GM couvraient 10,8 millions d'hectares, étaient cultivés par plus de 7 millions de paysans, et représentaient 93% de la production de coton en Inde (James, 2012). Comme en Chine, plusieurs études ont mis en évidence que les cotonniers GM permettent une réduction de l'usage des insecticides estimée à environ 50% et, en limitant les pertes liées aux ravageurs, conduisent à une augmentation des rendements d'environ 30% (Qaim, 2009 ; Kouser and Qaim, 2011 ; Krishna et al., 2012). Au-delà des bénéfices pour les propriétaires, les récoltes plus importantes ont permis une augmentation du revenu des paysans, et en particulier des femmes, celles-ci étant traditionnellement employées lors de la collecte du coton (Subramanian et Qaim, 2010). Une étude nutritionnelle a été réalisée entre 2002 et 2008 dans les provinces de Maharashtra, Karnataka, Andhra Pradesh et Tamil Nadu, afin d'étudier l'impact de ces cultures sur la sécurité alimentaire des petits agriculteurs indiens. L'étude a impliqué 533 propriétaires, possédant en moyenne 5 ha, la moitié des surfaces étant dédiée à la culture des cotonniers. Les auteurs ont estimé que, pour chaque hectare de cotonnier, il y avait un bénéfice de 74 kcal/personne et par jour, soit 5% de plus que pour les agriculteurs n'ayant pas adopté le coton GM (Qaim and Kouser, 2013). Des bénéfices ont également été notés pour la santé des cultivateurs indiens. Les analyses portant sur les années 2002 à 2008 montrent que les cotonniers GM auraient permis d'éviter 2,4 millions de cas d'empoisonnements causés par l'utilisation massive de pesticides dans les plantations, ce qui aboutit à préserver 14 millions de dollars US chaque année en coûts médicaux (Kouser and Qaim, 2011).

Ces travaux sont cependant contestés par d'autres chercheurs, qui pointent des biais dans les analyses (Qayum et Sakkhari, 2005). Si globalement des impacts positifs sont reconnus, les années où les populations de ravageurs sont naturellement faibles, le surcoût lié au prix des graines GM n'est pas compensé par l'augmentation de rendement, et les cultivateurs de cotonniers non transgéniques font des bénéfices plus importants. Il en est de même les années où une sécheresse marquée peut avoir pour conséquence une diminution du niveau d'expression des gènes Bt, les cultures étant alors à nouveau affectées par les ravageurs. A ce jour, les cotonniers Bt sont les seules plantes GM commercialisées en Inde. L'aubergine Brinjal Bt résistante au foreur des tiges *Helicoverpa arimegera* a fait l'objet de nombreux essais au champ, mais sa commercialisation reste l'objet d'un moratoire en raison des nombreuses inquiétudes exprimées par les consommateurs et des organisations non gouvernementales (Kumar et al., 2011).

- *Afrique du Sud*

L'Afrique du Sud, premier pays africain à avoir adopté les PGM, a cultivé des cotonniers transgéniques pour la première fois en 1997. Une étude d'impact liée à cette culture a été entreprise, couvrant les données recueillies entre les années 1999 à 2005, dans l'une des régions les plus pauvres du pays, « Makhathini Flats » (Morse et Mannion, 2009). La culture du cotonnier y est une source majeure de revenus, avec de petites propriétés de 1 à 3 hectares. 60% des cultivateurs sont des femmes, une conséquence de la migration des hommes vers les villes. En 2002, 92% des agriculteurs de Makhathini Flats ont adopté les cotonniers Bt, et presque 100% en 2004-2005. Même si des variations sont observées, l'analyse portant sur 100 fermes met en évidence des bénéfices pour les cultivateurs ; ils ne sont pas le résultat de coûts réduits, mais d'une augmentation de rendement. Cette augmentation de rendement est à la fois liée à un meilleur contrôle des ravageurs, et au soin apporté par les cultivateurs à ces graines GM plus onéreuses que celles des cotonniers non GM.

Au-delà des cotonniers Bt, quels bénéfices associés aux plantes transgéniques pour les Pays du Sud ?

L'évaluation des bénéfices résultant des cultures GM nécessite un travail d'analyse complexe, au « cas par cas », prenant en compte la plante, les caractères introduits, les pratiques culturales, les

pays et les différentes régions au sein d'un même pays. Les aspects agronomiques, environnementaux, économiques et sociaux doivent être pris en compte, ces aspects n'étant par ailleurs pas indépendants les uns des autres, et variables selon les années. Il faut donc rester prudent face à des données bibliographiques parfois contradictoires, et qui évolueront sans doute encore au cours du temps.

- *Augmentation du rendement par réduction des pertes*

L'augmentation de rendement observée dans les pays en développement reste actuellement liée à un meilleur contrôle des ravageurs, qui aboutit à une réduction des pertes dans les récoltes (Brookes et Barfoot, 2013) (Tableau 2). Dans les pays en développement, l'augmentation de rendement peut atteindre 21% (Colombie) pour les maïs résistant aux insectes et 38% (Inde) pour les cotonniers. Dans les pays industrialisés, l'augmentation moyenne est de 9,8% pour les cotonniers HT et 7% pour les sojas HT et les cotonniers résistant aux insectes. Il faut noter que les augmentations de rendements dépendent de la pression exercée par les insectes lors de l'année d'étude, ce qui induit d'importantes fluctuations. Par ailleurs, un impact positif de ces cultures GM sur les cultures voisines non transgéniques a parfois été noté grâce à la diminution des populations de ravageurs (Hutchison et al., 2010).

Tableau 2 : Impacts des cultures de maïs et cotonniers génétiquement modifiés sur les rendements durant la période 1996-2011. D'après Brookes et Barfoot (2013).

Pays	Maïs Bt résistant à la pyrale	Cotonnier Bt
Pays industrialisés	Augmentation des rendements	
Etats Unis	+7%	+9,8%
Canada	+5%	-
Espagne	+9,9%	-
Pays en développement	Augmentation des rendements	
Chine	-	+10%
Afrique du Sud	+11%	+24%
Mexique	-	+10%
Argentine	+6,4%	+30%
Philippines	+18%	-
Uruguay	+5,6%	-
Inde	-	+38%
Colombie	+21%	+10%
Burkina Faso	-	+18%
Brésil	+12%	-0,3%
Pakistan	-	+13%

Myanmar (Birmanie)	-	+31%

- : valeurs non déterminées ou pays ne cultivant pas le maïs ou le cotonnier GM.

- *Bénéfices pour la santé*

Dans les pays en développement, les paysans manipulent souvent les produits herbicides et pesticides sans réelle protection. Comme indiqué précédemment pour les cultivateurs indiens, la réduction des traitements a donc un impact positif sur la santé. Huang et al. (2005) ont par exemple étudié les phénomènes d'empoisonnement dans les provinces de Hubei et Fujian en Chine, où des essais de riz résistants aux insectes sont en cours. Une analyse comparative de 123 agriculteurs produisant du riz GM avec 224 agriculteurs faisant pousser du riz non GM en 2002 et 2003 a mis en évidence que 11% de ceux cultivant le riz non GM avaient des symptômes d'empoisonnement, alors que ceux cultivant le riz GM n'en avait pas.

Au-delà de l'impact lié à la réduction des traitements phytosanitaires, les projets de biofortification ont pour objectif direct de lutter contre la malnutrition et contribuer à l'amélioration de la santé des populations.

- *Bénéfices pour l'environnement*

La réduction des insecticides a également un impact positif sur l'environnement, en protégeant les organismes non cibles contre d'éventuels traitements phytosanitaires peu sélectifs.

Avec les maïs et soja HT, une modification des pratiques agricoles a été observée, conduisant à une réduction des labours, limitant ainsi l'érosion et l'appauvrissement en éléments minéraux des sols. Comme aux Etats Unis, les labours ont été réduits de 25% à 58% en Argentine, ce qui est un facteur positif pour le bilan carbone lié à la production alimentaire (Beckert et al., 2011, Carpenter, 2011).

Enfin les augmentations de rendements permettent une utilisation optimale des 1,5 milliards d'hectares de terres cultivables au niveau mondial, prévenant de nouvelles déforestations et préservant des écosystèmes. Il est malheureusement estimé que 13 millions d'hectares de forêts tropicales disparaissent encore chaque année dans les pays en développement. Par ailleurs, le développement futur de plantes plus tolérantes à la sécheresse et à la salinité devrait contribuer à la réhabilitation de terres dégradées, devenues impropres au développement agricole.

- *Bénéfices économiques*

Une méta-analyse a été réalisée par Finger et al. (2011) visant à déterminer l'impact économique des cultures GM, en tenant compte des rendements, du coût des graines (Le coût supplémentaire des graines de cotonnier Bt peut par exemple aller de 28% en Chine à 200% en Inde), des pesticides, du travail au champ, et ce sur une période de 10 ans. Le travail s'est basé sur l'analyse de 203 publications scientifiques, concernant l'Inde, la Chine, l'Afrique du sud, l'Argentine, les Etats-Unis et l'Espagne, et porte principalement sur la culture du cotonnier et du maïs. S'il y a globalement un impact positif lié aux cultures GM, les résultats sont, comme attendus, très hétérogènes entre pays et au sein d'un pays. Les pays les plus pauvres qui ont des pratiques agricoles limitées, retirent les bénéfices les plus importants en raison d'une diminution des pertes des récoltes, alors que les pays riches tirent leur bénéfice d'une réduction du coût des cultures (moins de traitements phytosanitaires et de labours).

Si la majorité des bénéfices enregistrés au Sud résulte de la culture des cotonniers Bt et du soja tolérants au glyphosate, d'importants bénéfices ont également été observés avec le maïs Bt et le soja Bt en Amérique latine, Argentine, Bolivie, Brésil, Colombie, Paraguay et Uruguay (Mannion et Morse, 2013). Pour les plantes HT, le bénéfice est principalement lié à une réduction du coût lié au contrôle des adventices et au gain de temps lié à la simplification des pratiques culturales (Beckert et al., 2011). Par ailleurs, dans certains pays comme l'Argentine, la réduction des labours offre la possibilité de réaliser deux cycles de culture lors d'une même saison, le soja HT étant

planté directement après la culture de blé. Toujours en Argentine, les études mettent en évidence que les petits cultivateurs tirent moins de bénéfices que les grands propriétaires, en raison du surcoût occasionné par l'achat d'engrais nécessaire à un rendement optimal des variétés GM.

Cependant, quel que soit le pays, un suivi à plus long terme s'avère indispensable, le développement possible au cours du temps d'insectes résistants et d'adventices dans les cultures GM, ainsi que le monopole exercé par les fournisseurs de graines, pouvant modifier la balance bénéfices/risques.

Les risques associés aux plantes transgéniques dans les pays du sud

On retrouve dans les pays en développement des risques identiques à ceux identifiés dans les pays industrialisés, qui requièrent des procédures d'évaluation déclinant les risques pour la santé humaine ou animale, pour l'environnement, et les risques économiques. Des difficultés supplémentaires peuvent cependant être observées en raison d'un manque de connaissance des petits cultivateurs dans le domaine des biotechnologies végétales.

** Risques associés aux plantes résistantes aux insectes*

On peut craindre l'apparition d'insectes résistants liée aux monocultures de plantes Bt, et tout particulièrement des cotonniers Bt cultivés à très large échelle en Chine et en Inde (Tabashnik et al., 2009). L'association de plusieurs gènes conférant une résistance aux insectes, réalisée par exemple dans le cotonnier Bollgard®II, devrait contribuer à limiter ce risque. Le respect de zones refuges dédiées à la culture de semences non GM fait également partie des stratégies permettant de limiter l'apparition de ces populations de ravageurs résistants.

La difficulté liée au respect des zones refuges vient parfois du manque d'information ou de connaissances des paysans. Une étude réalisée en Inde a mis en évidence que 50% des cultivateurs de cotonnier Bt ne respectent pas les recommandations de culture, c'est-à-dire de réserver 20% de la surface de leurs champs à la zone refuge (Singla et al., 2012). Il ressort que ces cultivateurs, soit n'ont pas été informés de cette recommandation, soit considèrent que leurs terres sont trop petites pour dédier 20% des surfaces à des graines non GM sensibles aux ravageurs.

La réduction des traitements insecticides sur les plantes Bt peut conduire au développement de nouvelles populations d'insectes qui étaient précédemment contrôlées par les traitements phytosanitaires. Ce phénomène a été observé par exemple en Chine où le contrôle d'*H. armigera* par le cotonnier Bt a conduit au développement de punaises qui n'étaient présentes que de façon sporadique dans le nord de la Chine (Lu et al., 2010). Ce résultat met en évidence le nécessaire travail d'évaluation des risques, et le suivi des conséquences liées aux modifications des pratiques agronomiques.

** Risques associés aux plantes tolérantes aux herbicides*

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide, et en particulier au glyphosate (Roundup de Monsanto), représentent la majeure partie des surfaces cultivées en PGM sur la planète (James, 2012 ; Green, 2012). C'est un caractère que l'on retrouve dans le soja cultivé à grande échelle en Amérique latine. En 2011 par exemple, 20,8 millions d'hectares (soit 82,7% des surfaces dédiées au soja) étaient cultivés au Brésil en soja HT, ou possédaient un empilement HT et gène de résistance à des insectes. Cette diffusion du soja HT, ajoutée à celle de maïs HT et de cotonnier HT, a entraîné la forte croissance de l'emploi du glyphosate. Les Etats-unis ont été le premier pays touché par l'apparition d'adventices résistantes à cet herbicide dans les champs GM. Ce même phénomène de résistance a ensuite affecté l'Argentine et le Brésil (Powles, 2008). En 2011 au Brésil, cinq adventices résistantes au glyphosate, *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist, *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Lolium multiflorum* Lam., *Digitaria insularis* (L.) Mez ex Ekman, et *Euphorbia*

heterophylla L. ont été identifiées (Cerdeira et al., 2011). Pour éviter ce risque, une meilleure gestion du désherbage par l'herbicide doit être mise en place, ainsi que des rotations permettant d'éviter la succession de cultures tolérantes au glyphosate. A l'échelle mondiale, il existe actuellement 24 adventices résistantes au glyphosate.

** Autres risques*

Prévenir le flux de gènes aux variétés non GM ou à des espèces apparentées doit être intégré aux pratiques agricoles, les mesures de prévention étant définies au cas par cas. On peut aussi craindre que le développement d'une agriculture plus intensive nécessite l'utilisation d'intrants qui peuvent fragiliser des terres peu fertiles. Enfin la monoculture participe à une perte de la diversité des variétés traditionnelles, et à des savoirs paysans qui se voient offrir de nouvelles variétés dont ils ne connaissent et ne comprennent pas toujours les propriétés.

L'information des paysans reste un facteur clé d'une bonne utilisation de cette technologie, nécessaire pour une gestion optimale sur le long terme. Eduquer des millions de paysans impliqués dans ces cultures, tant en Chine qu'en Inde, constitue un défi majeur (Yang et al., 2005). Une étude a montré que dans certaines régions du nord de la Chine, des cultivateurs continuent à traiter leur cotonnier Bt avec des formulations de toxines Bt, principalement par ignorance des caractéristiques exactes de la variété GM.

Les risques économiques vont se situer à plusieurs niveaux. On peut redouter une plus grande dépendance des paysans vis-à-vis des compagnies qui ont le monopole des graines GM, et parfois de la filière entière quand la fourniture des semences est subordonnée à la conclusion d'un contrat. Il ne leur est plus possible de conserver une partie de la récolte pour planter l'année suivante. Ces graines, vendues le plus souvent à un prix supérieur aux variétés non GM, peuvent également fragiliser les agriculteurs si les augmentations de rendements ne sont pas au rendez-vous. Enfin, une surproduction peut entraîner une diminution du cours des récoltes, ce facteur n'étant toutefois pas spécifique aux cultures GM.

La lente adoption des plantes transgéniques en Afrique

Si la « révolution verte » a peu bénéficié à l'Afrique, il semble au vu de la diversité des essais au champ en cours dans ce continent (Tableau 3), qu'il y ait une volonté de ce continent à bénéficier des nouvelles possibilités d'amélioration génétique offertes par la transgenèse végétale. Pourtant, seulement quatre pays sont actuellement impliqués dans des cultures à des fins commerciales, et les phases d'essais au champ sont le plus souvent très longues. Le plus grand obstacle résulte sans doute des études coûteuses nécessaires à l'évaluation et à l'autorisation de ces nouvelles variétés (plusieurs millions de dollars selon Berman et al., 2013). Les financements récents apportés par les fondations Gates et Buffet dans le domaine des biotechnologies végétales, le développement de partenariats public-privé, la mise en place de législations appropriées et de Comités de Biosécurité, pourraient conduire dans les prochaines années à un essor des cultures GM en Afrique, sous réserve qu'elles apportent un réel bénéfice aux agriculteurs (Karembu et al., 2009 ; Paarlberg, 2010 ; Okeno et al., 2013).

** L'empreinte de l'Europe sur la perception des plantes transgéniques dans certains pays*

La différence de perception des PGM entre les Etats-Unis, dont la politique vis-à-vis des biotechnologies est très dynamique, et l'Europe qui, marquée par le principe de précaution, a mis en place de longues procédures d'évaluation, n'est pas sans impact sur les difficultés de l'Afrique à se positionner vis-à-vis des plantes transgéniques. Certains lobbies anti-OGM y sont par ailleurs très actifs, et profitent du manque de connaissances scientifiques des citoyens. Des Comités de Biosécurité sont en place dans certains pays pour aider les politiques dans la prise de décision, mais

l'étude de la balance bénéfices/risques résultant de l'introduction d'une culture GM reste complexe et requiert de nombreuses expertises qui sont parfois difficiles à trouver (Obonyo et al., 2011). Certains pays proches de l'Europe préfèrent donc ne pas investir dans ces technologies, de crainte de perdre certains de leurs marchés à l'exportation, la séparation de filières GM et non GM étant trop complexe à gérer.

Tableau 3 *: Plantes transgéniques en cours d'évaluation au champ ou cultivées en Afrique. D'après Karembu et al. (2009).*

Plante	Caractère	Pays
Bananier	Qualités nutritionnelles, résistance aux maladies et aux champignons	Egypte, Ouganda
Canne à sucre	Amélioration de la croissance, contenu en sucre, résistance aux virus	Egypte, Maurice, Afrique du Sud
Cocotier	Résistance aux virus	Côte d'Ivoire, Ghana
Concombre	Résistance aux virus	Egypte
Cotonnier	Résistance aux insectes	Egypte, Kenya, Malawi, Tanzanie, Ouganda, Zimbabwe
Courge	Résistance aux virus	Egypte
Maïs	Tolérance à la sécheresse, à la salinité, résistance aux insectes	Kenya, Afrique du Sud, Tanzanie, Ouganda, Zimbabwe
Manioc	Qualités nutritionnelles, résistance aux maladies et aux virus	Egypte, Ghana, Kenya, Nigeria, Afrique du Sud, Ouganda
Melon	Résistance aux virus	Egypte
Niébé	Résistance aux insectes	Burkina Faso, Ghana, Nigeria
Sorgho	Qualités nutritionnelles	Burkina Faso, Kenya, Afrique du Sud
Tomate	Résistance aux virus	Egypte
Pomme de terre	Résistance aux virus, aux insectes et aux champignons	Egypte, Afrique du Sud
Patate douce	Résistance aux virus	Kenya, Afrique du Sud
Vigne	Résistance aux champignons	Afrique du Sud

On notera également que les travaux publiés en 2012 par l'équipe de Gilles-Eric Seralini n'ont pas été sans impact dans les pays en développement. Au Kenya, les plantes transgéniques ont été bloquées par décision politique en raison de la suspicion de cancer pouvant résulter de la consommation de maïs GM. Bien que la production de maïs ne soit pas suffisante pour couvrir la demande locale dans ce pays, les importations et la consommation d'OGM y ont été interdites, et les cultures prévues de cotonniers Bt ont été suspendues.

** Quelques projets emblématiques pour l'Afrique*

WEMA : 300 millions d'Africains dépendent du maïs comme source principale d'alimentation. WEMA (Water Efficient Maize for Africa) est un projet basé sur un partenariat public-privé, coordonné par l'AATF (African Agricultural Technology Foundation), visant à obtenir un maïs tolérant à la sécheresse et résistant aux insectes, capable d'avoir un meilleur rendement sous des

conditions de stress hydrique modéré (http://www.aatf-africa.org/wema/en/). Cinq pays africains sont impliqués, le Kenya, l'Ouganda, le Mozambique, l'Afrique du Sud et la Tanzanie. Le CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center) procure des variétés de maïs très productives adaptées aux conditions de l'Afrique, et apporte son expertise aux croisements et pour les tests de tolérance à la sécheresse. Monsanto et BASF contribuent pour les gènes d'intérêt et font bénéficier de leur expertise dans le domaine des biotechnologies. Un premier hybride obtenu par des méthodes conventionnelles pourrait être disponible dès 2014. Les variétés transgéniques seront quant à elles disponibles sans doute à la fin de la décennie (Cominelli et al., 2013). Elles contiendront le gène *CspB* de *Bacillus subtilis*, codant une protéine de stress ayant une activité chaperone d'ARN. Ce projet reçoit d'importants financements des fondations Bill & Melinda Gates et Howard Buffet.

VIRCA : Le manioc (*Manihot esculenta* Crantz) est une source majeure de calories pour plus de 300 millions de personnes dans l'Afrique sub-saharienne. Cultivé par des agriculteurs pauvres, souvent dans des zones marginales, le manioc est vital à la fois pour la sécurité alimentaire de ces agriculteurs et de leurs familles, et comme source de revenus. Des maladies virales, parmi lesquelles le virus de la mosaïque du manioc (« cassava mosaic disease », CMD) et le virus de la striure brune du manioc (« cassava brown streak disease », CBSD), sont responsables de pertes majeures dans les récoltes, et menacent la sécurité alimentaire de certains pays. En collaboration avec le Centre des sciences de la plante Donald Danford (Etats Unis), l'Institut de recherche agronomique du Kenya, et l'Institut national de recherche sur les cultures d'Ouganda, le projet VIRCA (« Virus resistant cassava for Africa ») a été mis en place en 2005, avec pour objectif d'améliorer par voie de transgenèse la résistance aux virus du manioc (Taylor et al., 2012). Dans le cadre d'une première phase du projet, des lignées transgéniques résistantes au CMD ont été produites et des évaluations au champ ont été réalisées au Kenya. Une seconde phase du projet comprend la production de lignées résistantes à la fois au CMD et au CBSD, l'évaluation de ces plantes au champ et leur transfert aux agriculteurs. Cette phase de développement reçoit le soutien des fondations Bill& Melinda Gates, Howard Buffet, de Monsanto et de l'USAID (Agence des Etats Unis pour le développement international).

NGICA : le niébé (*Vigna unguiculata* L.) est une légumineuse consommée par près de 200 millions de personnes en Afrique tropicale et une précieuse source de fourrage. Avec une valeur nutritive élevée et un contenu égal à 22-24% en protéines, il joue un rôle important dans l'équilibre nutritionnel des populations du Sahel. Cette plante tolérante à la sécheresse fixe l'azote grâce à une association symbiotique avec des bactéries rhizobium, contribuant ainsi à enrichir les sols. Les insectes constituent l'une des contraintes majeures de la production du niébé, et en particulier la pyrale foreuse des gousses, *Maruca vitrata*. Dès 2001, le réseau NGICA (« Network for the Genetic Improvement of Cowpea for Africa ») a été mis en place. Une collaboration entre le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) australien, les Universités de Purdue et du Michigan (Etats-unis), l'IITA, l'AATF et l'Université du Zimbabwe, a abouti à la mise d'une méthode de transfert génétique qui a permis l'introduction du gène de toxine Cry1Ab dans le niébé. Une évaluation de cette légumineuse transgénique est toujours en cours (Citadin et al., 2011).

** Le Burkina Faso, une expérience très suivie*

Avec 630 000 tonnes en 2012, le Burkina Faso est le premier producteur de coton d'Afrique de l'Ouest, et son développement économique repose principalement sur cette culture de rente. Elle représente, selon les années, entre 55% et 70% des recettes d'exportation, et fait vivre près de 3 millions de personnes en milieu rural, soit près du quart de la population nationale. Le coton Bt développé par Monsanto a été introduit en 2008, permettant de passer de 6 à seulement 2 traitements insecticides. La progression des surfaces GM a été constante entre 2008 et 2010, passant de 2% des surfaces plantées en cotonniers la première année, à 65% en 2010 (260 000 ha) (Vitale et al., 2010). En 2011, en raison du coût important des graines GM et de la déception des cultivateurs face aux rendements et à la qualité des fibres, les surfaces en cotonniers GM ont

diminué à 58% (247 000 ha) par rapport à 2010. En 2012, les surfaces avaient à nouveau progressé, atteignant 290 000 ha. Le gain moyen de rendement n'a pas dépassé 15% en cinq ans, avec de fortes disparités selon les conditions parasitaires, l'équipement de l'exploitation et le respect ou non du « mode d'emploi » du coton OGM. Les résultats décevants observés en 2010-2011 viendraient d'une part, du détournement de 35% des engrais destinés aux cotonniers, au profit des cultures de maïs ; et d'autre part au non-respect des pratiques agricoles conseillées, certains producteurs n'effectuant pas les deux traitements insecticides recommandés en fin de cycle. Cependant, durant la campagne 2011-2012, une production record de coton attribuée en partie aux cotonniers GM a été enregistrée. L'expérience du Burkina Faso, ses difficultés et ses succès, sont donc suivis avec attention en Afrique, en particulier par le Mali, le Ghana et le Bénin, qui sont encore hésitants face à l'adoption de ces nouvelles technologies.

Conclusions

Il est attendu 9 milliards d'êtres humains en 2050, et avec les changements de comportement alimentaires, en particulier dans les pays émergents, une augmentation de 70% de la demande agricole est anticipée. Le défi à relever à l'échelle de la planète est donc de produire plus, principalement sur les terres cultivées actuellement afin de préserver les écosystèmes et lutter contre la déforestation, tout en réduisant la consommation en intrants et en eau (Guillou et Matheron, 2011). Il faut également faire face au changement climatique qui, selon les variations de température anticipées (1°C à 3°C), pourrait contribuer à une diminution comprise entre 12% et 34% des terres cultivables dans les pays en développement, l'Afrique sub-saharienne étant particulièrement touchée par ce phénomène.

La première « révolution verte », par une intensification de l'utilisation d'intrants industriels, a permis un accroissement historique de la production agricole. Les objectifs sont désormais de sélectionner des variétés plus résistantes aux stress biotiques et abiotiques, plus productives, moins exigeantes en eau et en fertilisants. Le développement des cultures GM est perçu par certains comme une solution pour le futur (Borlaug, 2007 ; Juma, 2011), tandis que d'autres craignent au contraire qu'elles apportent un risque supplémentaire à la sécurité alimentaire. Ces nouvelles technologies mises au point par les pays industrialisés ne doivent pas être considérées comme une panacée pour les Pays du Sud ou une obligation lorsqu'il existe des solutions alternatives, mais constituent une innovation technologique complémentaire aux programmes d'amélioration génétique en cours. La transformation génétique permet désormais d'apporter de nouvelles réponses pour augmenter les rendements tout en limitant les intrants, améliorer la qualité des aliments, et résoudre les problèmes insolubles autrement. Pour les pays en développement, au-delà de l'aspect alimentaire, l'agriculture est un moteur essentiel du développement, source d'emploi et de revenus. Des impacts économiques positifs ont été mis en évidence avec le développement des cultures GM en Amérique latine, en Asie et en Afrique, mais il est difficile d'anticiper si ces bénéfices seront durables, en particulier pour les petits paysans. Il est évident que les plantes transgéniques ne suffiront pas à elles seules à résoudre la faim et la pauvreté dans le monde, mais, dans le cadre d'une utilisation raisonnée, elles peuvent être une pièce du puzzle.

Références

Aragão FJ, Nogueira EO, Tinoco ML, Faria JC. 2013. Molecular characterization of the first commercial transgenic common bean immune to the Bean golden mosaic virus. J. Biotechnol. 166 : 42-50.

Beckert M., Dessaux Y., Charlier C., Darmency H., Richard C., Savini I., Tibi A. (éditeurs), 2011 - *Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques.* Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, CNRS-INRA (France), 84 p, http://inra.dam.front.pad.brainsonic.com/ressources/afile/223293-076bc-resource-expertise-vth-synthese.html.

Berman J, Zhu C, Perez-Massot E, Arjo G, Zorrila-Lopez U, Masip G, Banakar R, Sanahuja G, Farré G, Miralpeix B, Bai C, Vamvaka E, Sabalza M, Twy man RM, Bassié L, Capell T, Christou P. 2013. Can the world afford to ignore biotechnology solutions that address food insecurity? Plant Mol. Biol. DOI 10.1007/s11103-013-0027-2.

Beyer P. 2010. Golden rice and « Golden » crops for human nutrition. New Biotechnol. 27 : 478-481.

Bonfim K, Faria JC, Nogueira EOPL, Mendes EA, Aragao FJL. 2007. RNAi-mediated resistance to Bean golden mosaic virus in genetically engineered common bean. Mol. Plant-Microbe Interact. 20 : 717-726.

Borlaug N. 2007. Feeding a hungry world. Science 318: 359.

Brookes G, Barfoot P. 2013. The global income and production effects of genetically modified (GM) crops 1996-2011. GM Crops and Food : Biotechnol. Agric. Food Chain 4 : 74-83.

Carpenter JE. 2010. Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops. Nature Biotechnol. 28 : 219-221.

Cerdeira AL, Gazziero DL, Duke SO, Matallo MB. 2011. Agricultural impacts of glyphosate-resistant soybean cultivation in South America. J. Agric. Food Chem. 59 : 5799-807.

Citadin CT, Ibrahim AB, Aragão FJ. 2011. Genetic engineering in Cowpea (*Vigna unguiculata*): history, status and prospects. GM Crops, 2 : 144-149.

Cominelli E, Conti L, Tonelli C, Galbiati M. 2013. Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. New Biotechnol., 30 : 355-361.

Demont M, Stein A. 2013. Global value of GM rice: a review of expected agronomic and consumer benefits. New Biotechnol. 30 : 426-436.

FAO. 2012. The State of Food Insecurity in the World. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Finger R, El Benni N, Kaphengst T, Evans C, Herbert S, Lehmann B, Morse S, Stupak N. 2011. A meta analysis on farm-level costs and benefits of GM crops. Sustainability 3 : 743-762.

Gonsalves D. 2006. Transgenic papaya: development, release, impact and challenges. Adv. Virus Res. 67: 317-54.

Green JM. 2012. The benefits of hercicide-resistant crops. Pest Mang. Sci. 68 : 1323-1331.

Guillou M, Matheron G. 2011. 9 milliards d'hommes à nourrir. François Bourin Editeur, Paris.

Huang J, Hu R, Rozelle S, Pray C. 2005. Insect resistant rice in farmers'fields : assessing productivity and health effects in China. Science 308 : 688-690.

Huang J, Mi J, Lin H, Wang Z, Chen R, et al. 2010. A decade of Bt cotton in Chinese fields: assessing the direct effects and indirect externalities of Bt cotton adoption in China. Sci. China Life Sci. 53: 981–991.

Hutchison WD, Burkness EC, Mitchell PD, Moon RD, Leslie TW, Fleischer SJ, Abrahamson M, Hamilton KL, Steffey KL, Gray ME, Hellmich RL, Kaster LV, Hunt TE, Wright RJ, Pecinovsky K, Rabaey TL, Flood BR, Raun ES. 2010. Areawide suppression of European corn borer with Bt maize reaps savings to non-Bt maize growers. Science 330 : 222-225

James C. 2012. Global status of commercialized biotech/GM crops : 2012. ISAAA Brief No 44. Ithaca, New York : ISAAA.

James C. 2013. Biotech Facts & Trends. Ithaca, New York : ISAAA.

Juma C. 2011. Preventing hunger: biotechnology is key. Nature 479 : 471–472.

Karembu M, Nguthi F, Abdel-Hamid I. 2009. Biotech crops in Africa-The final Frontier. Ithaca, New York : ISAAA.

Kathuria H., Jitender G, Tyagi H, Tyagi AK. 2007. Advances in Transgenic Rice Biotechnology. Crit. Rev. Plant Sci. 26 : 65-103.

Kouser S, Qaim M. 2011. Impact of Bt cotton on pesticide poisoning in smallholder agriculture: A panel data analysis. Ecological Economics 70 : 2105– 2113.

Kumar S, Misra A, Verma AK, Roy R, Tripathi A, Ansari KM, Das M, Dwivedi PD. 2011. Bt brinjal in India- A long way to go. GM Crops 2 : 92-98.

Krishna VV, Qaim M. 2012. Bt cotton and sustainability of pesticide reductions in India. Agric. Syst. 107 : 47–55.

Liu C, Li J, Gao J, Shen Z, Lu BR, Lin C. 2012. A built-in mechanism to mitigate the spread of insect-resistance and herbicide-tolerance transgenes into weedy rice populations. PLoS One. 2012;7 : e31625.

Lu Y, Wu K, Jiang Y, Xia B, Li P, Feng H, Wyckhuys KA, Guo Y. 2010. Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide scale adoption of Bt cotton in China. Science 328 : 1151-1154.

Mannion AM, Morse S. 2013. GM crops 1996-2012 : a review of agronomic, environmental and socio-economic impacts. University of Reading Geographical Paper N°. 195.

Ming R, Hou S, Feng Y, Yu Q, Dionne-Laporte A, Saw JH et al. 2008. The draft genome of the transgenic tropical fruit tree papaya (*Carica papaya* Linnaeus). Nature 452 : 991-996.

Morse S, Mannion AM. 2009. Can genetically modified cotton contribute to sustainable development in Africa? Progress Develop. Studies 9 : 225-247.

Obonyo DN, Nfor LM, Uzochukwu S. 2011. Identified gaps in biosafety knowledge and expertise in sub-saharan Africa. AgBioForum 14 : 71-82.

Okeno JA, Wolt JD, Misra MK, Rodriguez L. 2013. Africa's inevitable walk to genetically modified (GM) crops: opportunities and challenges for commercialization. New Biotechnol., 30 : 124-130.

Okusu H. 2009. Biotechnology research in the CGIAR: an overview. AgBioForum 12 : 70-77.

Paarlberg R. 2010. GMO Foods and crops: Africa's choice. New Biotechnol. 27 : 609-613.

Paine JA, Shipton CA, Chaggar S, Howells RM, Kennedy MJ, Vernon G, Wright SY, Hinchliffe E, Adams JL, Silverstone AL, Drake R. 2005. A new version of golden rice with increased pro-vitamin A content. Nature Biotechnol. 23 : 482-487.

Potrykus I. 2010. Lessons from the Humanitarian golden rice project: regulation prevents development of public good genetically engineered crop products. Nature Biotechnol. 27 : 466-472.

Powles SB. 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. Pest Manag. Sci. 64 : 360-365.

Qaim M. 2009. The economics of genetically modified crops. Annu. Rev. Res. Econ. 1 : 665-693.

Qaim M, Kauser S. 2013. Genetically modified crops and food security. PLos ONE 8: e64879.

Qayum A, Sakkari K. 2005. Did Bt cotton fail in 2003-2004? A season long study of Bt cotton in Andhra Pradesh. Hyderabad: Deccan Development Society and Permaculture Association of India.

Singla R, Johnson P, Misra S. 2012. Examination of regional-level efficient refuge requirements for Bt cotton in India. AgBioForum 15 : 303-314.

Subramanian A, Qaim M. 2010. The impact of Bt cotton on poor households in rural India. J. Develop. Stud. 46 : 295-311.

Tabashnik B, Van Rensburg JBJ, Carrière Y. 2009. Field-evolved insect resistance to Bt crops: definition, theory, and data. J. Econ. Entomol., 102: 2011-2025.

Taylor NJ, Halsey M, Gaitan-Solis E, Anderson P, Gichuki S, Miano D, Bua A, Alicai T, Fauquet CM. 2012. The VIRCA project – Virus resistant cassava for Africa. GM Crops and Food : Biotechnol. Agric. Food Chain 3 : 93-103.

Vitale JD, Ouattarra M, Traore T. 2010. The commercial application of GMO crops in Africa: Burkina Faso's decade of experience with Bt cotton. AgBioforum 13 : 320-332.

White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in huma diet – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. New Phytol. 182 : 49-84.

Wu K-M, Lu H-Q, Feng H-Q, Jiang Y-Y, Zhao JZ. 2008. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. Science 321 : 1676-1678.

Yang P, Iles M, Yan S, Jolliffe F. 2005. Farmers'knowledge, perceptions and practices in transgenic Bt cotton in small producer systems in Northern China. Crop Protection 24 : 229-239.

Ye X, Al-Babili S, Klöti A, Zhang J, Lucca P, Beyer P, Potrykus I. 2000. Engineering the provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm. Plant J. 11 : 1071-1078.