pour une planète vivante*

© D. Vallauri

Les arbres forestiers transgéniques

Etat des lieux

Daniel Vallauri & Emilie Thomas

Novembre 2008

Citation conseillée :
Vallauri D., Thomas E. 2008. Les arbres forestiers transgéniques. Etat des lieux. Rapport WWF, Marseille, 44 pages.

Mots clé :
Arbres / OGM / forêts / plantation / impact sur l'environnement.

Les arbres forestiers transgéniques, pour un moratoire immédiat

L'artificialisation ultime des forêts par un modèle de gestion productiviste ? Les arbres génétiquement modifiés sont avant tout destinés à accroître la productivité et la qualité du bois produit pour les industriels papetiers.

© Daniel Vallauri

© Daniel Vallauri

©WWF-Canon / Edward Parker

→ Un arbre transgénique, c'est quoi ?

Le terme de transgénique s'applique uniquement à des arbres (et leurs descendants) résultant de techniques in vitro manipulant les acides nucléiques, en incluant les recombinaisons de l'ADN et l'injection directe d'acides nucléiques dans des cellules ou organelles, ou la fusion de cellules au-delà des limites de la taxonomie. Ceci n'est pas possible en milieu naturel.

Chez les arbres, deux méthodes d'introduction du transgène ont été utilisées : la transformation via *Agrobacterium tumefaciens* et l'introduction mécanique (figure 1).

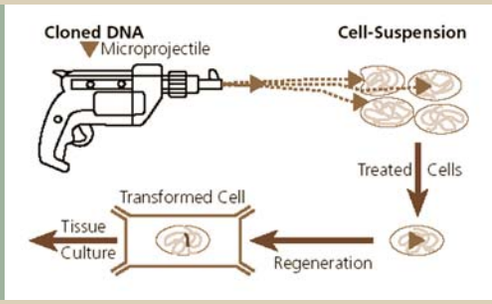


Figure 1. Schématisation de l'introduction mécanique de transgène ou méthode dite biolistique (Balocchi, 2004).

→ Des arbres forestiers transgéniques, pour quoi faire ?

Les promoteurs des arbres forestiers transgéniques présentent cette technologie comme une solution à tous les problèmes industriels voire écologiques :

1. l'augmentation de la croissance ;
2. la diminution du taux de lignine pour la papeterie ;
3. la résistance aux insectes, aux maladies et aux herbicides ;
4. la résistance aux stress de l'environnement (sècheresse par exemple) ;
5. la phytoremédiation de terrains pollués ;
6. la séquestration du carbone et la production de biocarburants ;
7. la stérilisation des arbres transgéniques dangereux !

Notons que la proposition de stérilisation des arbres transgéniques dangereux par une nouvelle transgenèse mène jusqu'à l'absurde total le raisonnement.

Les arbres transgéniques créent plus de problèmes qu'ils n'en résolvent, à un coût financier et écologique potentiel très fort. Une meilleure gestion de la diversité dans les paysages de plantations industrielles permettrait de bien meilleurs résultats immédiats (Jactel *et al.* 2006).

→ Etat des lieux en 2007

A partir des bases de données recensant les essais soumis à déclaration, il est possible de montrer que les essais touchent les cinq continents. Face aux contraintes réglementaires développées en Europe, au Canada et aux USA, les essais en champs se sont délocalisés pour partie dans les pays du sud.

En 2007, 37 nouveaux essais en champs sont en cours aux USA, sur 8 espèces forestières. Les essais canadiens se concentrent sur le peuplier et l'épinette. La France est le pays d'Europe qui effectue le plus d'essais (INRA), y compris avec des essais en champ de peupliers transgéniques à lignine modifiée. Des tests en champs d'arbres transgéniques américains ont été mis en place au Brésil (eucalyptus génétiquement modifiés pour la production d'éthanol).

Figure 2. Les pays ayant développés sur leur sol des essais ou plantations commerciales d'arbres génétiquement modifiés.

→ Le cas prévisible et dangereux de la Chine

La Chine a mis en œuvre depuis 2003 les premières plantations conséquentes de peupliers transgéniques en milieu naturel, dans le cadre d'un reboisement à grande échelle. Plus d'un million de peupliers transgéniques résistants à des insectes furent plantés. 400 000 plants supplémentaires sont prévus à la plantation. Une grande peupleraie transgénique existe ainsi. Or le magazine New Scientist a révélé que « personne ne sait exactement où tous ces arbres ont été plantés ». L'information est confirmée dans le rapport de la FAO par le Pr. Wang (Académie chinoise pour les forêts). Mélangés à d'autres plants non transgéniques, sans doute en contact avec des peupliers natifs sauvages, ils sont libérés dans la nature. Cette situation ne ralentit pourtant pas les projets, puisqu'en en 2012 le gouvernement chinois ambitionne d'atteindre 44 millions d'hectares de plantations forestières transgéniques (Inf'OGM n°70).

→ Evaluation du risque

Les principales raisons s'opposant aux arbres transgéniques sont identiques aux autres OGM.

Des caractéristiques particulières aux arbres et aux forêts compliquent grandement le problème de la dissémination des arbres transgéniques. Ce sont :

- la taille des arbres qui rend impossible la culture en milieu confiné, même au moment des recherches ;
- le potentiel naturel de reproduction et dissémination très fort des arbres ;
- la durée de vie très longue des arbres, en conditions naturelles comme en plantations ;
- les surfaces considérables nécessaires aux forêts et aux plantations industrielles ;
- la complexité par définition des écosystèmes forestiers, ceux-ci échangeant naturellement et sur de vaste surface avec les écosystèmes alentours, au travers de la pollinisation, de la dissémination des graines, par l'entremise de vecteurs biologiques comme les insectes, mammifères ou oiseaux qu'ils abritent.

Peu d'études d'impacts existent

En général, les études reposent sur une approche réductionniste, limitée à un problème, restreinte dans l'espace et dans le temps. Peu envisagent l'impact écologique avec une approche intégrative :

- distinguant l'effet « transgénique » de l'effet déjà désastreux sur le biodiversité des « plantations monoclonales ». Les deux effets seront cumulés en plantation industrielle transgénique ;
- abordant les échelles réelles du risque, spatiale et temporelle notamment ;
- la simple question de savoir si l'on est capable d'évaluer (ou au moins suivre) à long terme le risque pose question.

→ Des régulations timides et générales

Les arbres transgéniques sont soumis aux législations couvrant les OGM, soit :

- la **Convention sur la Biodiversité** avec le **protocole de Carthagène**. Entré en vigueur en septembre 2003, ce protocole légifère sur les mouvements transfrontières des OGM, en termes de responsabilité, de traçabilité et d'identification. Il permet de prononcer un moratoire sur l'importation d'une plante OGM ;
- l'**Accord sur l'application de mesures sanitaires et phytosanitaires de l'OMC** (1995) qui oblige les gouvernements à baser leur législation sur l'évaluation des risques plutôt que sur le principe de précaution. C'est sur la base de cet accord que les Etats-Unis, le Canada, l'Argentine et l'Egypte ont dénoncé le moratoire européen sur les OGM.

L'écocertification des produits forestiers est destinée à garantir la qualité de la gestion et des pratiques, de la forêt au consommateur. Seul le FSC exclu clairement l'utilisation d'arbres transgéniques des produits certifiés (principe 6.8). D'autres systèmes les acceptent (SFI) ou ne statuent pas globalement (PEFC).

→ Conclusion

La racine du problème

La gestion des forêts est en profonde évolution depuis les années 1990. Les notions d'écosystème, de biodiversité, de naturalité et de services environnementaux progressent.

Toutefois, la vision extractiviste et productiviste perdure également. Elle continue de se développer en parallèle et jusqu'à l'absurde économiquement inutile, écologiquement dangereux, socialement rejeté.

Arbre transgénique : solution à quoi ?

La biotechnologie des arbres transgéniques crée autant de problèmes épineux – voire impossibles à résoudre qu'elle ne peut espérer en résoudre. Elle conduit également à occulter d'autres alternatives plus profitables d'un point de vue écologique, économique et social.

Il est dès lors pertinent de se poser la question de l'intérêt réel, pour la société, d'investir dans les arbres transgéniques en termes d'applications commerciales ?

Le WWF demande un moratoire immédiat sur l'usage ou la libération d'arbres transgéniques.

→ Pour en savoir plus

Vallauri D., Thomas E. 2008.
Les arbres forestiers transgéniques.
Rapport WWF, Marseille, 44 pages.

Daniel Vallauri
WWF-France
6 rue des Fabres
13001 Marseille
dvallauri@wwf.fr

www.wwf.fr

Je suis là depuis tant et tant de saisons que j'en vacille. (..) J'ai vu les hommes changer sans cesse (…), corriger la partition de la nature comme s'ils la maudissaient de lui devoir leur existence. J'ai vu les hommes poursuivre le rêve de se créer eux-mêmes dans une situation de maîtrise absolue. Et quand ils y sont parvenus, ils se sont sans doute persuadés qu'il n'en avait jamais été autrement, qu'il ne leur en coûterait rien.

Carole Zalberg
Les mémoires d'un arbre
Le cherche midi, 2002

Nous nous enfermons dans une course infernale entre la dégradation écologique qui nous dégrade en retour, et les solutions technologiques qui soignent les effets de ces maux tout en en développant les causes.

Edgar Morin
La méthode. II. La vie de la vie
Editions du Seuil, 1980

Sommaire

Introduction ..... **p. 4**
Eléments du contexte mondial forestier ..... p. 4
Pourquoi des forêts génétiquement modifiées ? ..... p. 4
Où en est-on aujourd'hui ? ..... p. 4

Les biotechnologies utilisées en forêt en quelques mots ..... **p. 6**
Les biotechnologies sans transgenèse ..... p. 6
Les croisements classiques ..... p. 6
Reproduction végétative et clonage ..... p. 6
Clonage par embryogenèse somatique ..... p. 7
Génomique ..... p. 7
Qu'est-ce qu'un arbre transgénique ? ..... p. 7
Définition officielle ..... p. 7
La transgenèse ..... p. 8

Pourquoi des arbres forestiers transgéniques ? ..... **p. 9**
Augmentation de la croissance ..... p. 9
Amélioration de la qualité du bois ..... p. 10
Résistance aux insectes et aux maladies ..... p. 11
Tolérance aux herbicides ..... p. 11
Résistance aux stress de l'environnement ..... p. 11
Phytoremédiation ..... p. 12
Séquestration du carbone ..... p. 12
Production d'agrocarburants ..... p. 12
Stérilisation des arbres ..... p. 13

Etat des lieux ..... **p. 14**
Etat des lieux en 1999 ..... p. 14
Etat des lieux en 2002 ..... p. 14
Etat des lieux en 2007 ..... p. 14
Fort développement en champ dans les pays du sud ..... p. 16
Reboisement à grande échelle : le cas inquiétant de la Chine ..... p. 16
Poursuite des recherches dans les pays développés ..... p. 16

Evaluation des risques écologiques ..... **p. 18**
Particularités des risques de la transgenèse chez les arbres ..... p. 18
Evaluation des risques écologiques – approche réductionniste ..... p. 18
Quel degré de pollution par le flux de transgènes ? ..... p. 18
Peut-on rendre stérile une plantation d'arbre transgénique ? ..... p. 20
Le transgène est-il stable une fois libéré dans la nature ? ..... p. 20
Quelles conséquences de la réduction de la lignine ? ..... p. 20
Résistance aux insecticides et herbicides : un nouveau danger ? ..... p. 21
Les arbres trangéniques vont-ils envahir le monde ? ..... p. 21
Evaluation des risques écologiques – approche intégrative ..... p. 22
Effet « transgénique » ou effet « plantation clonale » ? ..... p. 22
A l'échelle de la plantation ..... p. 23
A l'échelle du paysage ..... p. 23
A l'échelle du temps ..... p. 23
Est-on capable de suivre à long terme les risques ? ..... p. 24
Est-on capable d'évaluer les risques sur la nature ? ..... p. 24

Evaluation des impacts et risques économiques ..... **p. 25**
Bénéfices potentiels des arbres transgéniques (selon Sedjo, 2005a) ..... p. 25
Coûts des arbres transgéniques ..... p. 25
Incertitudes et risques induits ..... p. 25

Perception des risques et réactions de la société ..... **p. 27**
Perception par la société ..... p. 27
Eléments de droit ..... p. 28
Régulation par le marché : l'écocertification ..... p. 29

Conclusion et perspectives ..... **p. 30**
Arbres forestiers transgéniques : pour un moratoire immédiat ..... p. 30
Ne pas oublier la racine du problème ..... p. 30
Vers un New Deal écologique ? ..... p. 31

Références ..... **p. 34**

Autres ressources et glossaire ..... **p. 42**

Annexe ..... **p. 43**

Introduction

Le WWF travaille à la protection des forêts. Pour cela il étudie et aborde toute la complexité scientifique, économique, sociale et culturelle des réalités forestières. Sur le gradient de naturalité (Vallauri 2007), ce rapport aborde l'un des extrêmes actuels de l'artificialisation des forêts par une gestion productiviste : les arbres génétiquement modifiés.

Eléments du contexte mondial forestier

A l'échelle mondiale, la forte demande en bois industriel, ainsi que la destruction des forêts naturelles, ont conduit au développement des plantations pour l'approvisionnement en produits ligneux. Il y a actuellement 200 millions d'hectares de plantations forestières dans le monde (soit environ 6 % des forêts). Une petite proportion, souvent dénommées plantations à croissance rapide, est estimée[1] à 40 millions d'hectares au niveau mondial. Elles sont gérées de façon très intensives et contribueront de façon disproportionnée à la fourniture en bois industriel à l'avenir. Il est estimé qu'en Asie, Afrique et Amérique latine, jusqu'à 40 % de l'approvisionnement en bois industriel proviendra en 2010 d'une telle source.

Les plantations à croissance rapide sont controversées. La plus grande part de leur expansion s'est faite par le passé dans le monde par la conversion de forêts naturelles ou d'autres espaces à haute valeur pour la conservation de la nature (prairies, zones humides). Ces plantations sont des monocultures ; ces « déserts » écologiques monopolisent souvent l'intégralité d'un paysage de plusieurs milliers d'hectares. Les techniques de gestion, faisant appel très fréquemment aux labours, à la fertilisation chimique et aux insecticides/herbicides ont un impact non négligeable sur la qualité de l'eau, des sols et de la biodiversité. Enfin, leur mise en place a également eu, dans de nombreux cas, des conséquences sociales négatives significatives du fait de la non prise en compte des droits et des intérêts des communautés locales et des autres fonctions du territoire.

Pourquoi des forêts génétiquement modifiées ?

C'est dans un tel contexte et cette « culture » des plantations industrielles que se développent les arbres génétiquement modifiés.
Ajoutons que sur le marché mondial, la demande s'accroît (bois ronds, pâte à papier, bois énergie). La compétition en terme de coût de production de la

[1] Cossalter et Pye-Smith (2003) estiment la surface des plantations à croissance rapide à 10 millions d'hectares, avec un accroissement annuel approximativement égal à 1 million d'hectares. Ils définissent les plantations à croissance rapide comme « des plantations commerciales gérées de façon intensive, développées en blocs d'une seule espèce, qui produisent des bois ronds pour l'industrie avec des taux de croissance élevés (accroissement moyen annuel supérieur ou égal à 15 m^3 par hectare) et qui sont exploitées avant l'âge de 20 ans. Appliquer une définition plus large fondée sur les données de la FAO sur les espèces à croissance potentiellement rapide (eucalyptus, acacia et pins à croissance rapide) et ceci sans différencier par l'objectif de gestion ou la performance, conduit à un chiffre plus élevé de 40 millions d'hectares. En France, les peupleraies, les taillis à courte révolution et les monocultures résineuses sont la traduction nationale, certes de moindre intensité en terme de rapidité de croissance, de ce modèle de gestion forestière. Ces plantations représentent environ 1,9 millions d'hectares en 2005 (12,6% des forêts) d'après les données du ministère de l'Agriculture, pour des objectifs variés (sciage, déroulage, pâte à papier, bois énergie). De façon plus générale, environ 41% des forêts métropolitaines sont régénérées par plantation (33900 ha/an).

matière première s'intensifie également, notamment avec la mondialisation du marché et l'entrée significative de pays à bas coûts de production (Brésil, Indonésie…).
Le développement d'arbres transgéniques a été présenté comme une solution à tous les problèmes (réduction de la déforestation, puits de carbone,… voir ci-après) mais il est surtout destiné à accroître la productivité et la qualité du bois produit pour les papetiers, ainsi qu'à diminuer les coûts de production à l'usine.
Cette biotechnologie particulière correspond d'un point de vue de la « culture » sylvicole au prolongement de la vision productiviste et agronomique des forêts initiée dans les années 1950. Elle utilise toutefois des technologies d'un degré bien différent des techniques classiques de clonage, pourtant déjà critiquées en plantation industrielle monoclonale.

Où en est-on aujourd'hui ?

Le premier arbre transgénique a été développé il y a une vingtaine d'années. Toutefois, l'opinion publique négative vis à vis des productions agricoles génétiquement modifiées et le coût de la technologie a longtemps limité son développement.
Comme nous le détaillerons dans ce document, les principales raisons s'opposant aux arbres génétiquement modifiés sont :
- **le risque** de dommages irréversibles sur l'environnement dû à la manipulation de gènes étrangers à l'espèce d'arbre concernée et leur libération inévitable dans la nature ;
- **l'impossibilité** de suivi des conséquences de cette manipulation, surtout sur des arbres forestiers dont la vie, même dans les plantations industrielles les plus intensives, dépasse la décennie et couvrent potentiellement des centaines de milliers d'hectares ;
- **le coût de développement et de commercialisation** qui rend caduque tout espoir de rentabilité réelle, sauf aide publique pour la recherche. Seuls les pays riches et les compagnies industrielles privées peuvent envisager un tel investissement ;
- **la forte réticence de la société** dans les pays développés et partout où une information libre et transparente est disponible.

Ce document constitue une synthèse générale de la bibliographie disponible en 2008 sur le thème des arbres forestiers génétiquement modifiés, dans le monde et avec un regard plus précis sur ce qui se passe en Europe et en France. Les différentes applications des arbres génétiquement modifiés sont présentées après un bref rappel sur l'utilisation des autres biotechnologies dans le domaine forestier. Un bref état des lieux du développement des arbres génétiquement modifiés et de leur utilisation en plantation dans le monde est présenté pour la période 1999-2007. Les risques écologiques potentiels sont exposés, ainsi que les rares études d'impacts existantes. Enfin, un point est fait sur quelques aspects complémentaires importants, économiques, sociaux et réglementaires.

© WWF-Canon / Michel Gunther

Plantation industrielle d'Eucalyptus dans l'écorégion de la forêt atlantique au Brésil

Les biotechnologies utilisées en forêt en quelques mots

Les biotechnologies sans transgenèse

Les croisements classiques

Les techniques de croisement classiques utilisées sur les arbres forestiers sont fondées sur la reproduction sexuée (verger à graines, contrôle de la pollinisation et de la production des semences). Elles donnent de bons résultats en termes de gain génétique, mais la longueur des générations chez les arbres rend le processus très lent. Cette lenteur présente toutefois l'avantage d'éprouver le matériel végétal dans les conditions environnementales locales, au fil des ans, de façon à éviter des problèmes ultérieurs en plantation.

Les biotechnologies qui suivent sont utilisées afin d'accélérer la sélection et la multiplication du matériel végétal à planter. Cet avantage au moment de la sélection s'avère augmenter grandement le risque d'échec par inadaptation des plants à long terme lors d'un développement en champ, car la sélection se fait pour partie « en aveugle », avec une faible confrontation aux conditions réelles du milieu et leurs variations.

Reproduction végétative et clonage

(d'après Lelu-Walter et Harvengt, 2004, Kellison et al., 2004)

La multiplication végétative est une faculté naturelle de certaines espèces végétales. Dans quelques cas très précis, elle conduit dans la nature à la constitution d'un peuplement clonal (ex. du tremble). Ceci est toutefois rare et limité par la compétition entre les arbres et par les conditions du milieu.

© D. Vallauri

La production en pépinières de boutures et clones d'arbres forestiers

La reproduction végétative est utilisée depuis longtemps pour la sélection des arbres (bouturage, marcottage, greffage). C'est le meilleur moyen d'accélérer la production de matériel amélioré et de maximiser le gain génétique dont il est porteur. Il ne convient pas à certaines espèces, telles que les conifères.

L'identification commerciale, la sélection rigoureuse et la culture en champ des clones (plantation monoclonale) est utilisée depuis une trentaine d'années sur diverses espèces (Peuplier et Eucalyptus notamment). Ce type de plantation présente un impact fort sur la biodiversité (voir page 26).

Clonage par embryogenèse somatique

(d'après Lelu-Walter et Harvengt, 2004, Kellison *et al.*, 2004)

L'embryogenèse somatique est une méthode apparue dans les années 80. Elle donne des résultats efficaces, mais nécessite un investissement en laboratoire important. C'est une technique de culture in vitro qui permet une production en masse en laboratoire d'arbres génétiquement identiques à partir d'un embryon de départ. Cet embryon, cultivé sur un milieu enrichi en hormones, va produire d'autres embryons, dits somatiques, qui se développeront ensuite sur un milieu de croissance pour donner des plants.

Les embryons somatiques peuvent aussi être conservés grâce à la cryoconservation, de façon à renouveler jusqu'à plusieurs fois par an les pieds mères, minimisant les coûts de gestion par rapport à un matériel végétal en pépinière (gain de temps et d'espace).

L'embryogenèse somatique se révèle intéressante pour sa vitesse de multiplication élevée, la possibilité d'une production planifiée, et la conservation du matériel génétique. Elle reste cependant une technique coûteuse. Les plants issus d'embryons somatiques peuvent servir à constituer au mieux les pieds mères sur lesquels sont prélevées des boutures disponibles pour le reboisement.

Génomique

Divers travaux (d'après Boerjan, 2005, Kellison *et al.*, 2004) ont été menés pour l'étude du génome des arbres, en particulier sur le peuplier qui a été choisi comme modèle : études génomiques et protéomiques, banques de séquences (EST*), cartes génétiques et études QTL*. La sélection assistée par les marqueurs identifiés ne donne pas pour l'instant de bons résultats sur les arbres, à cause des temps de génération importants.

Qu'est-ce qu'un arbre transgénique ?

Définition officielle

Les organismes génétiquement modifiés sont définis très précisément. La définition qui suit est la base actuelle de toutes les législations sur les OGM et la sécurité biologique dans le monde.
« Le terme OGM s'applique uniquement à des organismes (et leurs descendants) résultant de techniques in vitro manipulant les acides nucléiques, en incluant les recombinaisons de l'ADN et l'injection directe d'acides nucléiques dans des cellules ou organelles, ou la fusion de cellules au-delà des limites de la taxonomie », chose qui n'est pas possible en milieu naturel.

© D. Vallauri

La production de plants forestiers in vitro

Le terme d'OGM ne s'applique pas aux organismes reproduits par les autres méthodes, même nouvelles et technologiques, ou complexes de ces méthodes (techniques accélérées, mutagenèse, marqueurs génétiques, information sur les séquences de gènes, etc.) tant qu'une technique in vitro relative à la manipulation des acides nucléiques ou la fusion de cellules n'est pas impliquée.

La transgenèse

La transgenèse (d'après Boerjan, 2005, Kellison *et al.*, 2004, Sedjo, 2004a, Gallais et Ricroch 2006) consiste à introduire un gène étranger dans le génome d'une cellule hôte afin de donner à cette cellule une nouvelle caractéristique. L'arbre est dit alors transgénique ou génétiquement modifié.

Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier le gène d'intérêt qui va apporter la modification phénotypique voulue, par exemple la production d'une molécule non sécrétée par la cellule hôte. Chez les arbres, deux méthodes d'introduction du transgène ont été utilisées :
- la transformation via *Agrobacterium tumefaciens* ;
- l'introduction mécanique (ou biolistique*) (figure 1 ; Balocchi, 2004).

Le développement d'arbres génétiquement modifiés présente deux avantages : accélérer la sélection des traits désirés, et pouvoir introduire des caractéristiques non présentes chez l'espèce. Les recherches ont débuté dans les années 90, essentiellement dans le but de réduire les coûts de l'industrie du papier. Elles se diversifient aujourd'hui.

L'utilisation de la transgenèse présente de nombreuses limitations techniques à résoudre au cours du développement : localisation et nombre de copies du gène, expression dans un organe spécifique, propagation (l'embryogenèse somatique peut être utilisée pour multiplier les arbres transgéniques), stabilité de la transformation, stérilité…

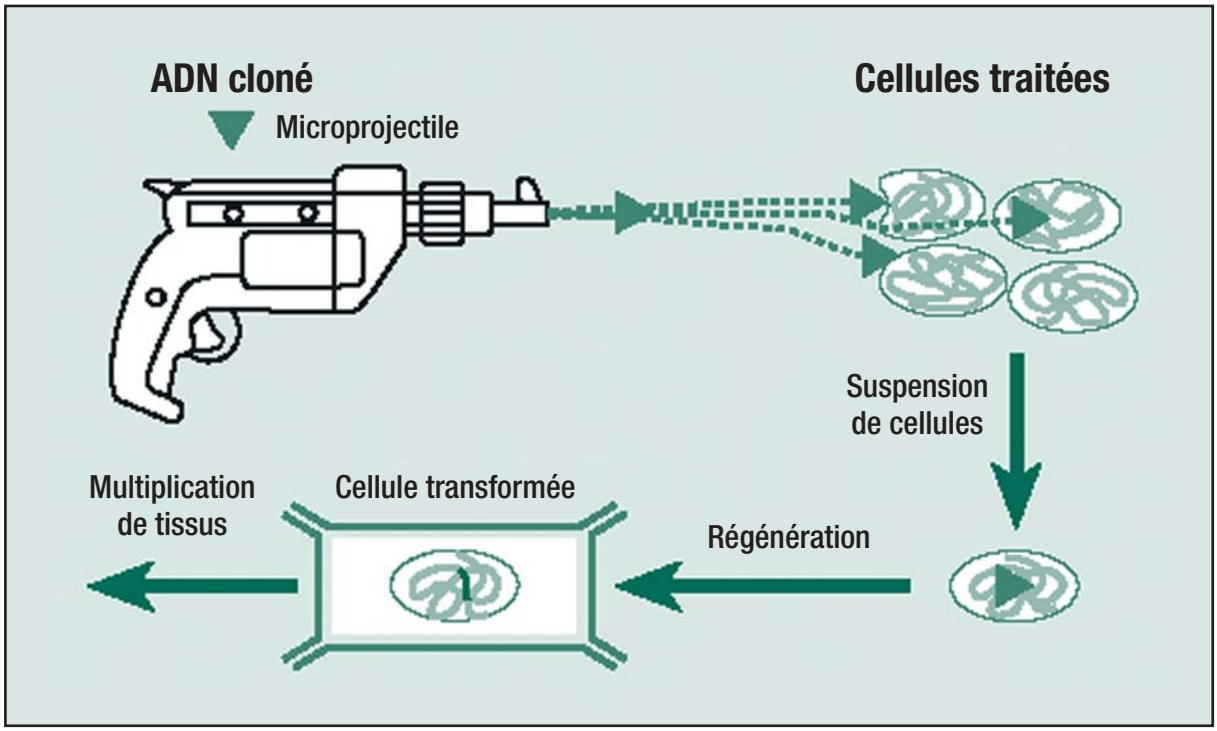


Figure 1. Schématisation de l'introduction mécanique de transgène ou méthode dite biolistique (traduit de Balocchi, 2004)

Pourquoi des arbres forestiers transgéniques ?

Les équipes de recherches travaillent sur la mise au point de diverses applications des arbres génétiquement modifiés. Une liste de gènes et de techniques utilisés est disponible dans Boerjan (2005). Nous résumons ici les domaines de recherches et d'applications.

Même s'il est souvent mis en avant de nouvelles applications censées résoudre des problèmes écologiques ces dernières années, la plupart cherche l'augmentation de la productivité et la qualité de la ressource pour l'industrie papetière.

Augmentation de la croissance

Les paramètres de la croissance des arbres sont un équilibre entre le potentiel de l'espèce et les conditions du milieu (fertilité des sols, climat, cycles des éléments). Augmenter et accélérer la croissance a toujours été un désir du forestier ou de l'agriculteur. L'objectif est de réaliser des plantations présentant des temps de rotation plus courts, des volumes récoltés plus élevés et des récoltes plus rapprochées. Cela implique l'amélioration des arbres, pour une adaptation optimale aux conditions du milieu, et la modification de celles-ci par la fertilisation, les amendements, le drainage ou l'irrigation.

Dans les recherches sur la transgenèse, il est envisagé d'améliorer la croissance des arbres par diverses méthodes, dont :

- la recherche de la sur-expression ou sous-expression de gènes impliqués dans la production de cellulose/hémicellulose/lignine ou de tous autres gènes impliqués dans l'élongation et la division cellulaire (Boerjan, 2005, Jing, 2004, Kawaoka, 2003, Park, 2004, Tuominen, 1995) ;
- la recherche de la stérilité. L'énergie dépensée pour le développement des structures reproductives est considérée inutile dans les plantations industrielles, dont le renouvellement se fait exclusivement par plantation avec du matériel végétal nouveau. La stérilité des arbres rendrait disponible cette énergie pour une croissance supérieure.

© WWF-Canon / M. Gunther

Augmenter le rendement de l'industrie dirige la logique de plantation et de sélection des arbres

Amélioration de la qualité du bois

L'amélioration de la qualité du bois produit est une préoccupation constante du forestier qui peut agir par la sylviculture et la sélection du matériel végétal sur les caractéristiques mécaniques et visuelles du bois produit.

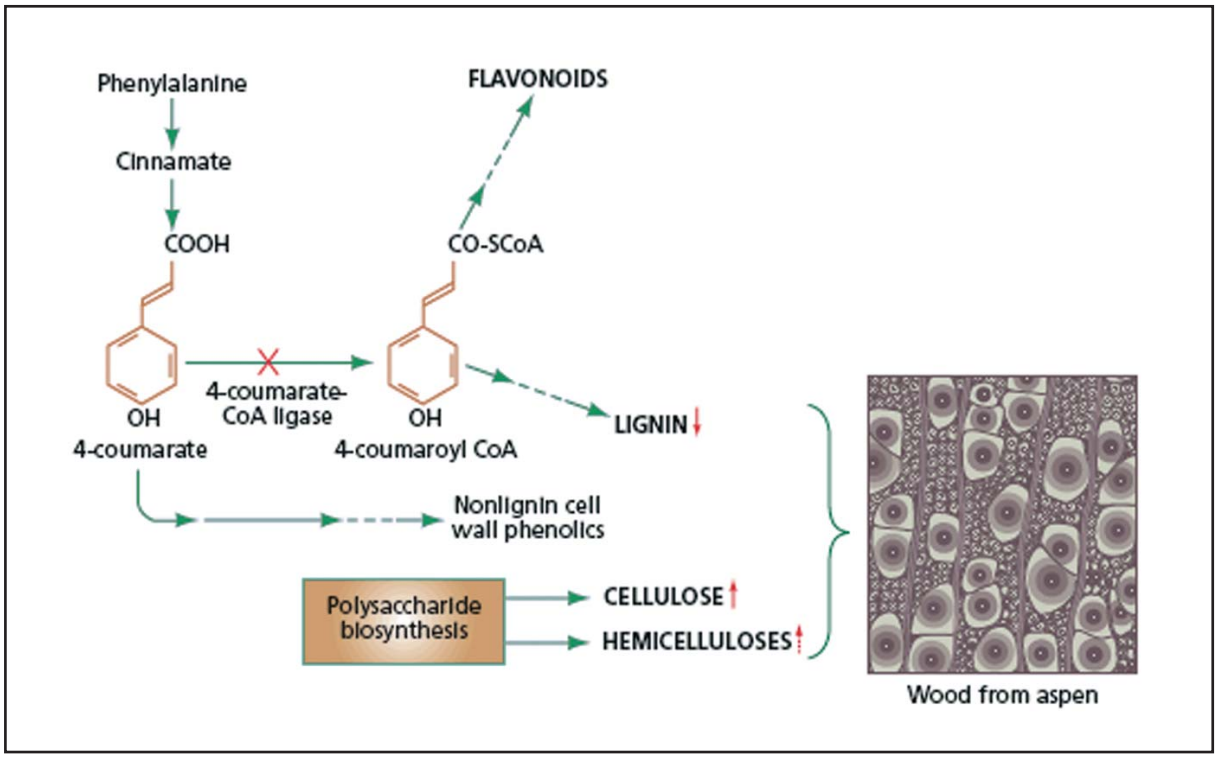
Dans les plantations industrielles pour la pâte à papier, l'amélioration de la qualité du bois est pilotée par un faible nombre de critères industriels. Ainsi, les recherches pour les arbres transgeniques portent principalement sur :
- l'uniformité du produit (hauteur, diamètre…) ;
- la réduction de la proportion de bois juvénile ;
- l'augmentation de la densité du bois ;
- la réduction du taux de lignine et la modification du type de lignine ;
- l'augmentation du taux de cellulose et la modification du type d'hémicellulose.

Le principal enjeu concerne la lignine, composé chimique complexe présent dans les cellules des plantes, qui permet au bois d'obtenir sa rigidité et aux arbres de soutenir le poids des houppiers et de résister aux aléas. Comme dans toute plante élevée, la lignine est fortement présente dans les arbres. Elle doit être séparée du bois pour réaliser de la pâte à papier. La lignine est considéré par les industriels comme un déchet. Son extraction est coûteuse et polluante (énergie, chimie).

Plusieurs gènes de la biosynthèse des polysaccharides ont été identifiés et utilisés pour modifier les taux de lignine dans la paroi cellulaire (figure 2 ; Kellison *et al.*, 2004, Baucher, 2003, Lapierre, 1999, Sederoff, 1999, Pilate, 2002).

© WWF-Canon / E. Parker

Pour la pâte à papier, la réduction du taux de lignine et la modification du type de lignine sont recherchées



© B. Crimi

Figure 2. **Voies de biosynthèse de la lignine (Sederoff, 1999)**

Résistance aux insectes et aux maladies

Les plantations monoclonales et à croissance rapide sont des écosystèmes tellement simplifiés et appauvris qu'ils sont extrêmement fragiles. Les pullulations de ravageurs ne sont pas contrôlées par les cortèges de parasitoïdes et de prédateurs habituels. Ces pullulations sont pénalisantes pour la production.

Ainsi la solution écologique serait, comme le font certains auteurs, de suggérer une diversification des plantations industrielles, à la marge mais suffisante pour réduire les populations de ravageurs. Cela peut s'obtenir notamment par la conservation d'îlots de forêt naturelle en bon état de conservation dans les paysages de plantations monospécifiques (Brokerhoff *et al.* 2006, Jactel *et al.* 2006).

Les adeptes des arbres transgéniques tentent d'autres options. Des arbres transgéniques Bt* ont été développés pour résister à divers insectes prédateurs (Lachance, 2007, Tang, 2003, Génissel, 2007). Des recherches ont également été faites sur des maladies bactériennes (Mentag, 2003), virales et fongiques (Noël, 2005). L'utilisation d'arbres génétiquement modifiés permettrait de réduire l'utilisation de pesticides qui est la solution la plus fréquemment utilisée aujourd'hui pour réduire les ravageurs dans les plantations industrielles.

Des arbres génétiquement modifiés ont été également développés pour conserver des espèces qui étaient menacées suite à l'introduction de pathogènes exotiques (Gartland 2004 in Kellison *et al.* 2004). C'est par exemple le cas du châtaignier américain qui a failli disparaître à cause du champignon *Cryphonectria parasitica* importé avec des châtaigniers asiatiques (Charman, 2005).

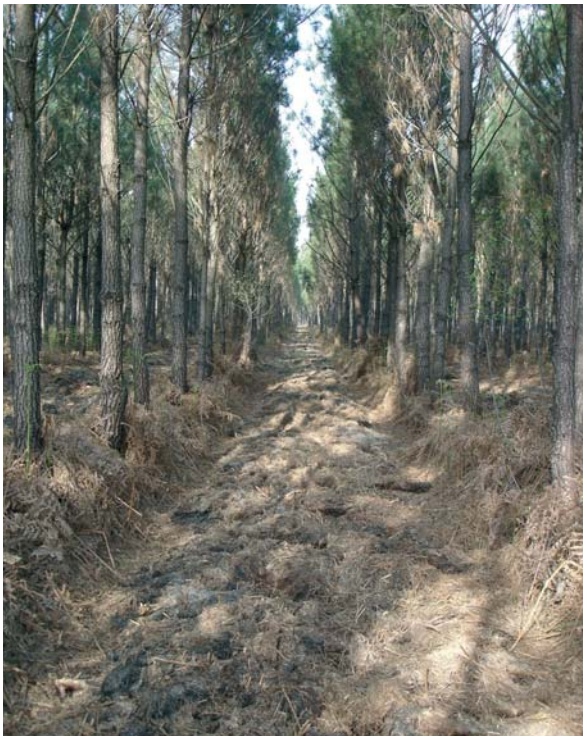
Tolérance aux herbicides

Les plantations industrielles sont consommatrices de fortes doses de produits phytosanitaires, là où les sylvicultures plus douces s'en passent allègrement. Les herbicides sont essentiellement utilisés lors de la préparation du sol avant la plantation, pour la dévitalisation des souches, pour le dégagement des plants les premières années après plantation.

Dans le monde, la recherche sur les arbres génétiquement modifiés tente de mettre au point des arbres tolérants au Round-up, herbicide à large spectre (peu sélectif). Une tolérance des arbres plantés permettrait de mieux utiliser ce produit dangereux dès la plantation des jeunes arbres et, selon ses promoteurs, de diminuer le nombre d'applications d'herbicide.

Résistance aux stress de l'environnement

La sélection de matériel forestier adapté au mieux aux conditions si variables et drastiques du milieu (froid, gelées, sécheresse, engorgement des sol, salinité…) est une autre problématique classique de la foresterie. Une sylviculture proche de la nature fonde son travail sur les meilleures provenances d'espèces natives adaptées et éprouvées par des milliers d'années de sélection par les pressions environnementales. La foresterie productiviste cherche depuis une cinquantaine d'années à introduire et manipuler des espèces et phénotypes en provenance des cinq continents, y compris des arbres qui peuvent s'avérer envahissants comme certains Eucalyptus ou Acacia.



© D. Vallauri

Les plantations industrielles sont souvent entretenues pendant lespremières années avec travail du sol mécanisé ou utilisation d'herbicides

Les arbres peuvent être génétiquement modifiés pour s'adapter à l'environnement de la plantation : tolérance au sel, résistance au froid, aux gelées et à la sécheresse (Gleeson, 2005, Hu, 2005). Une meilleure adaptabilité est également recherchée, qui puisse permettre de les cultiver dans des sols plus variés.

Phytoremédiation

La phytoremédiation consiste en la recherche de la dépollution des sols, le plus souvent après des industries lourdes, au travers de l'usage de végétaux. Ceux-ci permettent soit d'accélérer la fixation des polluants, soit de reverdir au mieux en résistant aux polluants.

Des essais avec des arbres génétiquement modifiés (Sykes, 1999) ont été réalisés pour la dépollution des sols contaminés par des métaux lourds. Les arbres sont de bons accumulateurs ; ils sont résistants aux polluants, ils possèdent un système racinaire profond et une forte capacité d'évapotranspiration. La modification génétique permet d'augmenter leur capacité accumulatrice ou de les adapter aux conditions climatiques du lieu à dépolluer. Des peupliers génétiquement modifiés ont été utilisés sur des sols contaminés au mercure.

© D. Vallauri

Lutter contre la déforestation et la dégradation des forêts est une solution bien plus efficace que les plantations industrielles pour séquestrer durablement du carbone

Séquestration du carbone

Le monde forestier s'intéresse depuis quelques années à la mission de lutter contre l'effet de serre. La solution unique ayant un écho est la plantation d'arbre à croissance rapide. Rappelons ici, que la plantation dans le monde n'est pas une réponse significative et durable aux changements climatiques au contraire de la réduction des émissions de gaz à effet de serre à la source et de la réduction de la déforestation. Cette réalité est notamment la conséquence de la durée de vie réduite des produits forestiers, essentiellement du papier et des bois d'industrie. Fort opportunément, l'agenda international pour lutter contre les changements climatiques comprend désormais des éléments visant à lutter contre la déforestation et la dégradation des forêts.

Depuis 2003, de nombreuses recherches ont pourtant été entreprises pour modifier génétiquement des arbres afin qu'ils croissent plus vite et absorbent plus de carbone. Ce domaine de recherche est en plein développement, bien que présentant peu d'avenir d'applications crédibles.

Production d'agrocarburants

Les carburants modernes provenant de la biomasse et neutres d'un point de vue du carbone présentent un potentiel pour devenir une source d'électricité et de chaleur dans les vingt prochaines années. Les recherches montrent qu'il y est possible pour les pays de l'OCDE de générer jusqu'à 20% de leurs besoins en électricité à partir de sources durables de biomasse d'ici 2020 (Bauen *et al.*, 2003).

La production d'agrocarburants par des arbres est envisagée. L'un des problèmes reste la disponibilité de la ressource. Le temps de croissance des arbres étant long, les recherches espèrent tout d'abord augmenter la croissance (voir page 13). D'autre

part, les recherches portent sur des arbres génétiquement modifiés qui contiendraient moins de lignine et plus de cellulose, et permettraient ainsi de produire plus rapidement un plus grande quantité d'éthanol (Dinus, 2001)

Stérilisation des arbres

Stériliser les arbres est recherché tout d'abord dans le but d'augmenter la croissance (voir page 13). D'autre part, l'utilisation d'arbres génétiquement modifiés en plantation forestière présente un risque très fort de libération incontrôlé dans l'environnement du transgène et de transmission aux arbres non génétiquement modifiés. Les arbres transgéniques peuvent avoir une influence sur la génétique d'autres arbres de l'écosystème forestier, qu'ils soient de la même espèce ou du même genre, sauvages ou cultivés par l'homme. Cette menace s'exprime bien au-delà des seules plantations et de façon durable dans le temps.

Mais, dans l'esprit de leur concepteur, un problème créé par la trangenèse peut être résolu par… une seconde trangenèse, sorte de fuite en avant dont on peut s'interroger sur les limites ? Ainsi, l'introduction d'un second transgène dans un arbre a été tenté de façon à le rendre stérile, en inhibant l'induction florale (Strauss, 1995, Meilan, 2001, Brunner, 2004).

© WWF-Canon / P. Glendell

Les pollens produits chaque année par la floraison des arbres sont disséminés sur des centaines de kilomètres

Etat des lieux

Pour comprendre l'ampleur des questions posées par les arbres transgéniques, il convient :
- d'une part, de distinguer les essais en laboratoire des essais en champ et des applications commerciales ou à grande échelle ;
- d'autre part, de suivre l'évolution et la montée en puissance des technologies relatives aux arbres génétiquement modifiés, sachant qu'ils sont chacun dangereux pour des raisons différentes.

Etat des lieux en 1999

En 1999, le rapport de synthèse du WWF relevait la situation suivante :

- Au total, **17 pays** effectuaient des essais en champ, soit **126 essais sur 24 espèces** ;

- En Europe, 31 essais avaient été effectués, sur 11 espèces natives plus l'eucalyptus ; 40 % portaient sur des gènes marqueurs (utilisés pour suivre le transgène lors de la transformation en laboratoire) ;

- En Amérique du Nord, 71 essais avaient été effectués, sur 5 espèces ; 53 % portaient sur la résistance aux pathogènes ;

- En Asie et Océanie, 10 essais avaient été effectués, sur 5 espèces ; 41 % portaient sur l'amélioration de la croissance ;

- En Amérique latine, 3 essais avaient été effectués, sur 3 espèces ;

- En Afrique, un seul essai avait été effectué sur la stérilité du pin en Afrique du sud.

Etat des lieux en 2002

En 2002, la situation a considérablement progressé (d'après Balocchi, 2004 ; figure 3 à 6, tableau 1 et 2) :

- **210 essais** en champ d'arbres génétiquement modifiés étaient enregistrés, pour une quinzaine d'espèces forestières ;

- pas moins de **520 programmes** de recherches et de développement étaient conduits dans **35 pays** ;

- la majorité des essais étaient menés aux USA (64 %). La France est le quatrième pays pour le nombre d'essais, et le premier pays européen devant la Finlande ;

- la plupart des espèces étaient des bois tendres (77 %), avec 55 % des essais menés sur le genre *Populus* ;

- les études portaient sur la tolérance aux herbicides (31 %) et les gènes marqueurs (23 %) ;

- la recherche est essentiellement menée par les organismes de recherches et les compagnies privées.

Etat des lieux en 2007

La liste des espèces d'arbres forestiers (et fruitiers) ayant fait l'objet d'essais de transgenèse en 2005 est donnée en annexe 1. A partir des bases de données recensant les essais soumis à déclaration (http://www.isb.vt.edu/cfdocs/globalfieldtests.cfm), il est possible d'ébaucher pour les arbres forestiers un bilan en 2007 (figure 7).

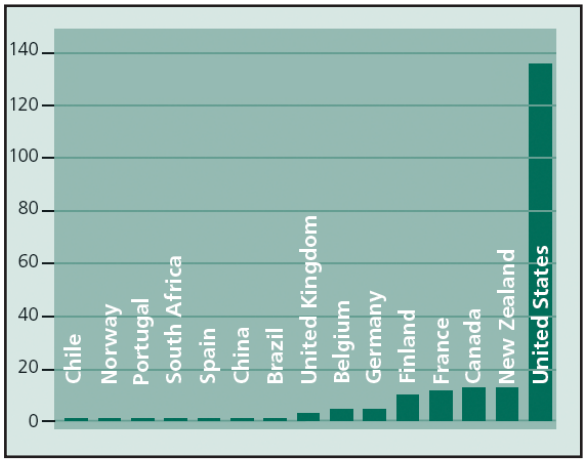


Figure 3. Nombre d'essais d'arbres génétiquement modifiés par pays sur la période 1988-2002 (Balocchi 2004).

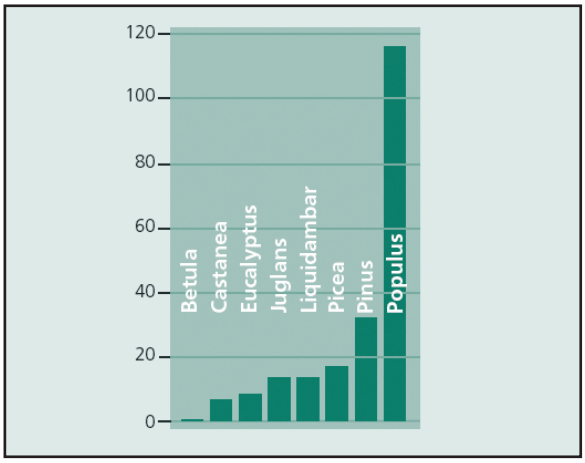


Figure 4. Nombre d'essais d'arbres génétiquement modifiés par genre sur la période 1988-2002 (Balocchi 2004).

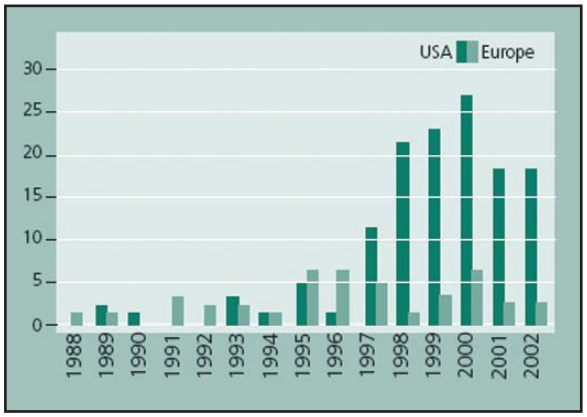


Figure 5. Nombre d'essais d'espèces forestières transgéniques par an sur la période 1988-2002 (Balocchi 2004).

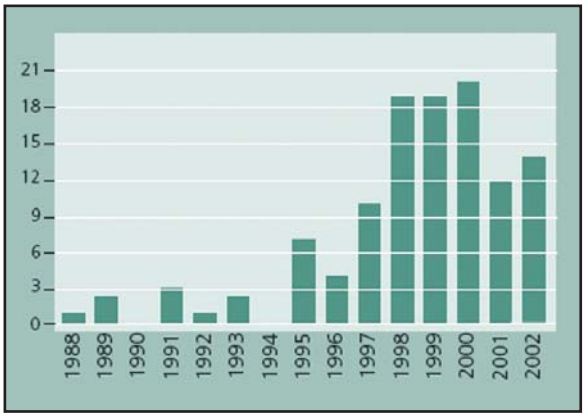


Figure 6. Nombre d'essais en champ sur les peupliers transgéniques, par an sur la période 1988-2002 (Balocchi 2004).

Tableau 1. Nombre d'essais d'arbres génétiquement modifiés par catégories de modification (traduit de Balocchi 2004).

But de la transgenèse	Total	%
Tolérance aux herbicides	65	31,8
Marqueur	47	22,8
Résistance aux insectes	30	14,6
Développement reproductif	20	9,7
Résistance aux maladies	11	5,3
Modification de la lignine	10	4,9
Croissance et morphologie	6	2,9
Phytorémédiation	4	1,9
Enracinement	3	1,5
Résistance virale	1	0,5
Résistance aux nématodes	1	0,5
Modification de la cellulose	1	0,5
Résistance bactérienne	1	0,5
Autres	4	1,9
Confidentiel	1	0,5
Pas d'information	1	0,5
Total	**206**	**100,0**

Tableau 2. Distribution des essais sur les arbres forestiers génétiquement modifiés par catégories d'acteurs (traduit de Balocchi 2004).

Organisme	nombre d'essais	%
Université	79	38
Entreprises privés	74	36
Organisme public de recherche	50	24
Inconnu	3	1
Total	**206**	**100**

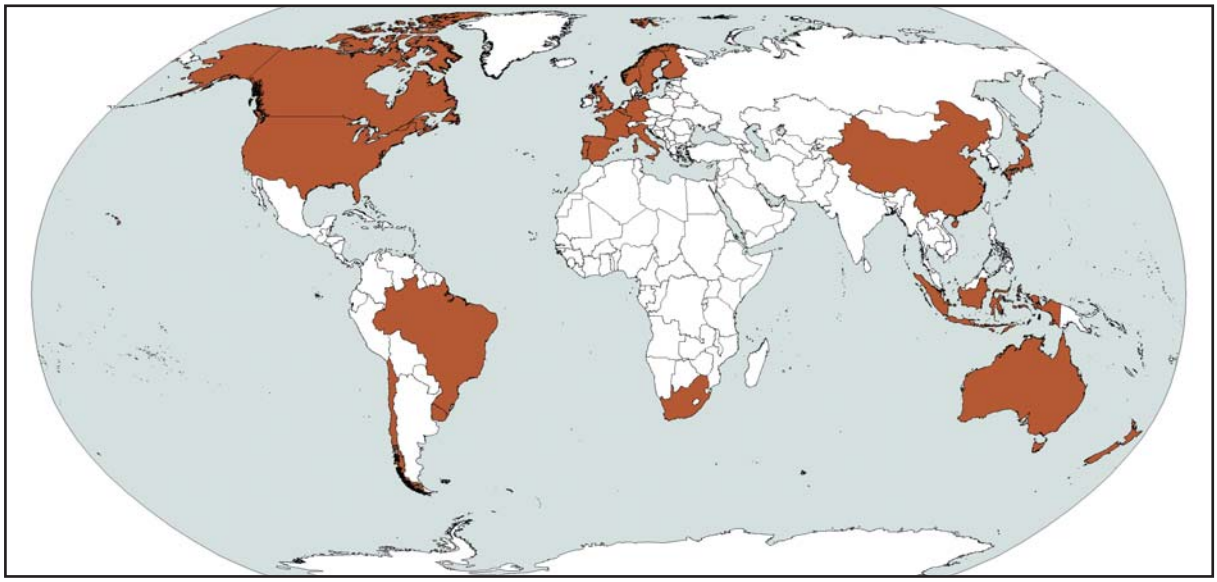


Figure 7 **Les pays ayant développés sur leur sol des essais en champ ou des plantations commerciales d'arbres génétiquement modifiés en 2007.**

Fort développement en champ dans les pays du sud

En 2007, les essais en champ touchent les cinq continents.

Aux USA, les OGM peuvent obtenir un statut de produit « non soumis à réglementation » (procédure légale de dérégulation). Une fois la dérégulation acceptée, plus aucun suivi fiable ne sera obligatoire. La procédure de dérégulation est toutefois à ce jour longue et contraignante, ce qui incite les laboratoires américains à délocaliser dans les pays en voie de développement leurs essais en champ et applications commerciales.

La société américaine ArborGen, leader dans le développement des arbres transgéniques, produit des pins à croissance accélérée, des eucalyptus pauvres en lignine et résistants au froid. Elle a obtenu en avril 2007 l'autorisation de tester au Brésil des eucalyptus génétiquement modifiés pour la production d'éthanol.

Reboisement à grande échelle : le cas inquiétant de la Chine

La Chine a mis en œuvre depuis 2003 les premières plantations conséquentes de peupliers transgéniques en milieu naturel. Dans le cadre d'un reboisement grande échelle, c'est ainsi plus d'un million de peupliers transgéniques résistants à des insectes qui furent plantés. 400 000 plants supplémentaires sont prévus à la plantation. Une grande peupleraie transgénique existe ainsi. Or le magazine New Scientist a révélé qu'avec le fonctionnement de l'administration chinoise, "personne ne sait exactement où tous ces arbres ont été plantés". Cette information a été confirmée dans un rapport de la FAO par le Pr. Wang (Académie chinoise pour les forêts). Mélangés à d'autres plants non transgéniques, sans doute en contact avec des peupliers natifs sauvages, ils sont libérés dans la nature. Cette situation ne ralentit pourtant pas les projets, puisqu'en 2012 le gouvernement chinois ambitionne d'atteindre les 44 millions d'hectares de plantations transgéniques – trois fois la surface forestière de la France (Inf'OGM n°70, http://www.infogm.org/spip.php?article2456#nb1). Ce seul exemple montre toutes les limites du contrôle de telles technologies à long terme (pourtant indispensable pour les arbres).

Poursuite des recherches dans les pays développés

37 nouveaux essais en champ ont été mis en place en 2007 aux USA, sur 8 espèces forestières. Les essais canadiens se concentrent sur le peuplier et l'épinette.

La France est le pays d'Europe qui effectue le plus d'essais (tableau 3). L'INRA d'Orléans a obtenu en 2007 l'autorisation de prolongation des essais en champ de peupliers transgéniques à lignine modifiée.

Tableau 3. **Principales recherches et essais en champ sur les arbres forestiers génétiquement modifiés en France entre 1993 et 2007 (source http://biotech.jrc.it/deliberate/gmo.asp).**

Année	Espèces	Caractères	Equipes
1993	Peuplier	Tolérance au glufosinate	Association Forêt-Cellulose (Afocel)
1995	Peuplier	Résistance aux insectes (Bt-derivée)	INRA Station de Zoologie Forestière et Station d'Amélioration des Arbres Forestiers (SAAF)
		Restauration de la stérilité/fertilité mâle	
1995	Peuplier hybride (alba x tremula)	Altération de la biosynthèse de la lignine	INRA Station d'Amélioration des Arbres Forestiers (SAAF)
		Régulation à la baisse de la réductase cinnamoyl CoA	
		Régulation à la baisse de l'o-methyl transférase	
1996	Tremble	Altération de la biosynthèse de la lignine	INRA Station d'Amélioration des Arbres Forestiers (SAAF)
		Régulation à la baisse de la réductase cinnamoyl CoA	
		Système marqueur	
1997	Peuplier hybride (alba x tremula)	Altération de la biosynthèse de la lignine	INRA Station d'Amélioration des Arbres Forestiers (SAAF)
		Régulation à la baisse de la réductase cinnamoyl CoA	
1999	Peuplier hybride (alba x tremula)	Altération de la biosynthèsede la lignine	INRA Centre de Recherche d'Orléans Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestière
		Régulation à la baisse de la réductase cinnamoyl CoA	
		Régulation à la baisse de l'o-methyl transférase	
1999	Peuplier hybride (alba x tremula)	Test de l'expression des gènes	INRA Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières
		Test de la stabilité des gènes	
2001	Peuplier hybride (alba x tremula)	Test de l'expression des gènes	INRA Centre de Recherche d'Orléans
	Tremble		
2003	Peuplier hybride (alba x tremula)	Régulation à la baisse de la déshydrogénase alcool cinnamyl	INRA
		Régulation à la baisse des gènes contrô-lant la floraison pour induire la stérilité	
		Amélioration de la production de papier	
		Amélioration de la qualité du bois	
2007	Peuplier hybride (alba x tremula)	Altération de la biosynthèse de la lignine	INRA Centre de Recherche d'Orléans

Evaluation des risques écologiques

(d'après Sedjo, 2004a, Hayes, 2001, Farnum, 2007, Halpin, 2007, Smouse, 2007, Brunner, 2007, Slavov, 2001, Di Fazio, 2002)

Particularités des risques de la transgenèse chez les arbres

Diverses questions écologiques sont apparues depuis le début du développement des arbres génétiquement modifiés. La plupart n'a pas été résolue, même s'il est résumé dans ce chapitre les toutes premières études d'impacts engagées.

La plupart des risques évoqués et illustrés ci-après pour les arbres génétiquement modifiés pose les mêmes questions que pour n'importe quel OGM. Il est toutefois utile de rappeler ici les caractéristiques particulières des arbres et des forêts qui compliquent grandement le problème de la dissémination des arbres génétiquement modifiés.

Ce sont :
- **la taille des arbres** adultes qui rend impossible la culture en milieu confiné, contrairement à certaines productions agricoles ;
- **le potentiel naturel de reproduction et de dissémination** très fort des arbres, par les pollens, les graines, mais également par la multiplication végétative ;
- **la durée de vie** très longue, en conditions naturelles (plusieurs centaines d'années) mais également en plantations industrielles (plusieurs décennies) ;
- **les surfaces** considérables nécessaires aux forêts et aux plantations industrielles, d'ailleurs déjà souvent concentrées dans certains pays ;
- **la complexité des écosystèmes**. Une grande forêt naturelle est composée et est le support de vie de plus 10 000 espèces animales, végétales et fongiques différentes, là où une plantation industrielle monoclonale en comprend seulement quelques centaines. Les processus fonctionnels d'une forêt naturelle sont complexes et sont spontanés (incontrôlables) par définition. Ils sont le moteur de l'écosystème ;
- **l'ouverture des écosystèmes**, ceux-ci échangeant naturellement et sur de vastes surfaces avec les écosystèmes alentours, au travers de la pollinisation, de la dissémination des graines, mais également par l'entremise de vecteurs biologiques comme les insectes, mammifères ou oiseaux qu'ils abritent.

Evaluation des risques écologiques – approche réductionniste

Ce chapitre consiste à isoler et discuter indépendamment certains des problèmes induits par l'introduction d'un arbre génétiquement modifié.

Quel degré de pollution par le flux de transgènes ?

La première raison de l'opposition aux arbres génétiquement modifiés est le risque de transfert du transgène aux populations sauvages. Les arbres sont de grande taille, vivent de nombreuses années même en

© D. Vallauri

Chaque arbre des plantations industrielles produit des milliers de grains de pollens ou de graines disséminés par le vent et les animaux.

plantation industrielle, produisent en abondance du pollen qui peut être transporté loin et des graines qui peuvent être disséminées sur de grands territoires.

Scientifiquement la dissémination des grains de pollen et graines est un domaine bien connu. L'analyse pollinique, qui est une technique de la paléoécologie couramment pratiquée pour reconstruire la composition de la végétation du passé, est connue pour donner une image géographiquement non précise de la végétation, du fait de cette forte dispersion des pollens des arbres. Il a été montré que certains pollens d'arbres nord américains peuvent être transportés sur des centaines de kilomètres et être retrouvés ainsi au milieu de l'océan Atlantique.

Le flux de gènes entre deux populations végétales comporte deux composantes principales à analyser :
- la dispersion du pollen ou des graines. Cela permet de répondre aux questions relatives à la distance, la vitesse et l'intensité de pollution potentielle des populations sauvages par le nouveau matériel végétal ;
- la capacité à créer une nouvelle génération en s'implantant dans le nouvel environnement.

De nombreux facteurs entrent en jeu : viabilité du pollen, synchronisation des floraisons, disponibilité en eau et en lumière, taux de germination des graines, résistance aux stress biotiques, coût métabolique du transgène… (Farnum, 2007, Williams, 2006b). Pour évaluer l'impact de l'introduction d'arbres transgéniques sur le flux de gènes des forêts, 3 types de modèles doivent être utilisés :
- les modèles de dispersion des millions de grains de pollens produits chaque année, mais également de dispersion des graines et des propagules par voie végétative ;
- les modèles qui considèrent les changements phénotypiques induits par le transgène et évaluent les capacités à produire une autre génération (pollen, graines) ;
- les modèles génétiques qui s'intéressent au devenir du transgène après introgression.

Ces modèles et les expérimentations doivent permettre de définir les paramètres dans des cas réels de terrain. L'étude des paramètres du premier type de modèles est assez classique en écologie. Elle peut être adaptée aux espèces d'arbres génétiquement

modifiés pour quantifier la probabilité de dissémination du transgène dans le milieu naturel. Les modèles statistiques et leurs équations des deux premiers types de modèles sont généralement étudiés de façon théorique ou appliquée (Smouse, 2007, Di Fazio, 2002 pour les peupliers par exemple).

Le dernier type de modèle reste le plus souvent à construire. Il permet pourtant de s'attacher aux réelles conséquences de l'introgression du transgène aux populations sauvages d'espèces génétiquement proches de l'arbre génétiquement modifié.

Peut-on rendre stérile une plantation d'arbre transgénique ?

De façon à éviter le problème des flux de gènes, il a été envisagé de stériliser les arbres transgéniques. Pour stériliser ou inhiber la reproduction sexuée d'un organisme trangénique, plusieurs solutions sont envisageables en agriculture. Elles ne sont pas toujours réalistes en forêt.

Par exemple :
- le confinement qui est envisagé pour les productions agricoles sous serres est irréaliste dans le domaine forestier ;
- le décalage des périodes de floraison par rapport aux population autochtones dépend des espèces et du contexte écologique ;
- la recherche de la non viabilité des pollens et des graines n'est pas encore au point ni absolue ;
- idem pour la recherche de la stérilité mâle.

Pour l'écologue, cette stérilisation pourrait être sans nul doute favorable pour éviter la dissémination du transgène dans le milieu naturel. Elle pose toutefois, deux questions nouvelles :
- quel est le risque de transmission de ce caractère pour les espèces proches en milieu naturel ? Si elle est faible, elle ne peut être exclue et conduirait à rendre stérile une partie des arbres du milieu naturel ;
- son innocuité pour la robustesse même de la plantation. Stériliser les arbres sur de vastes surfaces, c'est supprimer un processus fonctionnel de l'écosystème qui n'a pas de répercussions que sur les arbres, mais également sur les espèces se nourrissant des pollens, des graines, des fruits ou des fleurs et/ou participant à la dissémination (exemple des abeilles et des miels d'acacia ou d'eucalyptus produits en plantation). Les plantations clonales sont déjà des déserts écologiques ; un stérilisation totale ne peut que renforcer cette pauvreté. Quelles en seront les conséquences pour la biodiversité mais surtout sur la fragilité de l'écosystème ? La question est sérieuse.

Enfin, la stérilité n'empêche pas la reproduction végétative. Certaines espèces peuvent se reproduire par marcottage par exemple. Le flux de gènes ne peut donc être totalement exclu.

Le transgène est-il stable une fois libéré dans la nature ?

Question liée aux précédentes pour partie, la stabilité ou instabilité du transgène une fois libéré dans le milieu naturel est un facteur important du contrôle du devenir du transgène. Quel est le potentiel de maintien, de recombinaison ou de disparition d'un transgène au fil des générations ?

Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer la stabilité du transgène (Hawkins, 2003, Meilan, 2002). Elles ont conclu à la stabilité chez les arbres de l'expression du transgène sur une période supérieure à 10 ans.

Quelles conséquences de la réduction de la lignine ?

La lignine, dont le taux est élevé dans les tiges et les racines des arbres, leur confère une résistance inégalée dans le monde vivant. Sans celle-ci, comment imaginer l'improbable équilibre d'un arbre, cylindre de plusieurs dizaines de mètres de haut, reposant sur seulement quelques décimètres de diamètre ?

Diminuer le taux de lignine dans un arbre revient donc à fragiliser sa structure. Les arbres génétiquement modifiés pour réduire le taux de lignine dans les troncs seraient plus sensibles aux perturbations (vents, tempêtes). De plus, ils perdraient leur résistance vis-à-vis de certains champignons, insectes ou bactéries, ce qui obligerait à une utilisation accrue de pesticides.

L'importance de la lignine dans le cycle du carbone de la forêt soulève également des questions quand aux conséquences possibles de sa réduction dans l'environnement de l'arbre. Le bois (carbone, lignine,

cellulose) est à la base de relations entre les arbres et les microorganismes décomposeurs, de l'activité biologique et de la fertilité du sol à long terme. Il est toutefois à noter que d'une façon générale les plantations industrielles sont très pauvres en la matière. L'effet "arbre transgénique" ne sera sans doute significatif qu'à long terme.

Une étude expérimentale d'impact écologique de peupliers génétiquement modifiés pour réduire la lignine a été réalisée en France et en Angleterre jusqu'à l'âge de 4 ans (Halpin, 2007). L'étude, après comparaison entre une plantation transgénique et une plantation témoin, conclue à des évidences (peu de différences sur les indicateurs écologiques retenus) compte tenu du pas de temps et du type de plantation témoin. Il est à noter que cet essai a été arrêté suite à la destruction de la plantation expérimentale par des militants anti-OGM. Le seul résultat notable est un taux de décomposition racinaire plus élevé chez les arbres transgéniques (parois des cellules racinaires fragilisées par la modification de la lignine).

Résistance aux insecticides et herbicides : un nouveau danger ?

Les promoteurs de la trangenèse revendiquent que les applications d'insecticides vont diminuer. Cela est présenté comme un atout à court terme dans le cas d'usages d'insecticides peu sélectifs.

Mais peut-être est-il plus simple de prévenir les pullulations par :
- une délinéation plus écologique des paysages plantés (Mansourian *et al.* 2005, Brokerhoff et al, 2006, Jactel *et al.* 2006) ?
- la recherche d'une rusticité plus forte du matériel végétal ?
- et, en dernier recours, l'usage d'une lutte intégrée sélective et ciblée ?

Par ailleurs, à long terme, donner à un arbre la résistance à un insecticide ou un herbicide présente le danger potentiel de favoriser les populations d'insectes ou de plantes résistantes à ces produits. Une sélection qui réduirait à néant les efforts en quelques années. Il est envisagé pour réduire le risque de créer des zones refuges non génétiquement modifiés à côté. Mais cela est-il réellement possible ? Le risque à long terme existera toujours.

Les arbres trangéniques vont-ils envahir le monde ?

Toutes les résistances recherchées et possibles techniquement, la capacité de dispersion non négligeable des arbres transgéniques, au fil des ans, dans le milieu naturel, ont fait poser très clairement la question de la dangerosité potentielle des arbres transgéniques en tant que matériel végétal envahissant.

Le débat est d'autant plus sensible que la problématique des espèces envahissantes (animaux et plantes) est, avec les changements climatiques, l'une des cinq menaces avérées et majeures sur la biodiversité mondiale (Millenium Ecosystem Assessment 2005).

S'il est difficile de trancher globalement sur le caractère envahissant des arbres transgéniques qui pourraient être commercialisés, il est possible de rappeler quelques réalités illustrant la thématique :
- il existe plusieurs espèces d'arbres (non transgéniques) qui après avoir été utilisées dans les plantations à croissance rapide clonale se sont avérées invasives dans une région donnée. La responsabilité des industriels est indiscutable et parfois ancienne en la matière. Parmi celles-ci, des Acacia (en Asie du S-E et en Afrique du Sud par exemple) ou des Eucalyptus (en Afrique du Sud par exemple). Ces espèces, qui font encore l'objet de plantation, font également l'objet de recherche sur la transgenèse ;
- pour les entreprises responsables et les gouvernements, la lutte contre les espèces envahissantes est une lutte extrêmement coûteuse et un enjeu très pénalisant ;
- la seule mesure de gestion des espèces envahissantes sans risques induits et peu onéreuse est la prévention de leur introduction.

Evaluation des risques écologiques – approche intégrative

Effet « transgénique » ou effet « plantation clonale » ?

L'utilisation des arbres génétiquement modifiés est liée aux plantations industrielles clonales. Il est difficile de dissocier les impacts des plantations transgéniques des impacts du modèle plus général des plantations industrielles clonales (figure 8).

Ce type de plantation a des impacts sur l'environnement forts et connus. Ce sont notamment :
- **l'hyper-simplification de l'anthropo-écosystème** généré, qui présente une diversité des arbres réduite (un seul clone) sur de vastes surfaces. Cela a pour conséquences entre autres une réduction drastique de la biodiversité des autres formes de vie, une réduction – à l'échelle du peuplement voire du paysage - du rôle multifonctionnel reconnu aux forêts (réservoir de biodiversité, protection des eaux et des sols, lieu de chasse, d'usages récréatifs…) et une extrême fragilisation du peuplement d'arbres lui-même (d'où les problèmes parasitaires, d'incendies, d'épuisement des sols…) ;
- **la réduction de la diversité génétique des arbres**. Toutes les plantations industrielles clonales du monde entier reposent sur une poignée d'espèces d'arbres (quelques pins, eucalyptus, acacias ou peupliers), qui font l'objet de clonage, d'hybridation et de manipulation génétique. Cela présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la déconnexion totale du matériel végétal des processus de sélection naturelle et d'évolution classique oeuvrant dans la nature. De plus, l'investissement sur cette poignée d'espèces stérilise l'amélioration des connaissances et la valorisation des espèces natives, qui pourraient présenter une alternative intéressante, mais sont sous-étudiées au profit des « stars » commerciales mondiales. Dans le domaine tropical, à tradition sylvicole faible, cela conduit notamment à une désappropriation de la biodiversité native des arbres dans les sociétés ;
- **Augmentation du niveau de risque économique** intrinsèque des plantations industrielles. Les points précédents signifient évidemment un risque accrû en plantation (parasites, incendies, tempêtes…), notamment en relation avec les changements climatiques en cours ;
- **une dépendance technique** des planteurs vis-à-vis d'un matériel végétal dont il ne maîtrise, ne décide ni ne contrôle la genèse ni la qualité ;
- **la culture de l'artificialisation** qui soutient les plantations industrielles initie le cercle vicieux « vers toujours plus d'artificialisation » pour régler les problèmes générés. Pour l'illustrer, voir la proposition de seconde trangenèse pour obtenir la stérilité d'un arbre transgénique dont on craint la dissémination dans la nature…

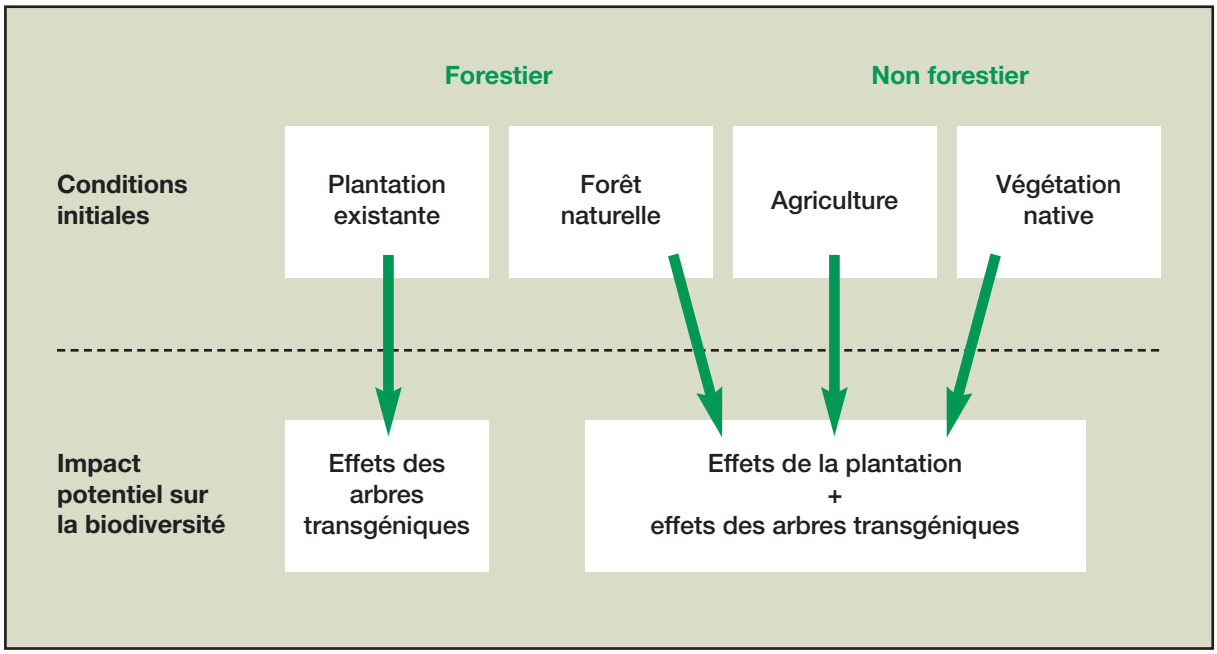


Figure 8. L'influence des plantations d'arbres transgéniques est plus ou moins sensible selon le contexte de la plantation.

A l'échelle de la plantation

Une plantation transgénique peut avoir des impacts sur plusieurs niveaux (Hayes, 2001) :
- l'anthropo-éco-système « plantation transgénique » lui-même ;
- l'environnement naturel entourant la plantation transgénique ;

Les faiblesses précédentes sont encore renforcées par l'introduction de matériel végétal trangénique sélectionné pour leur performance. Par exemple, quel est l'impact sur l'augmentation sur la croissance. Tous les arbres des plantations clonales transgéniques à croissance rapide vont mobiliser de façon très efficaces mais rigoureusement identiques les ressources en eau et en minéraux du sol. La croissance étant supérieure, les besoins en eau et minéraux vont être plus élevés. Ainsi, l'eau et les nutriments présents dans le sol sont consommés plus rapidement, impliquant une rupture dans l'équilibre sol-plante plus rapide. L'utilisation de fertilisants chimiques devient nécessaire pour pallier le manque de nutriments, comme c'est déjà le cas dans les plantations industrielles les plus intensives (Eucalyptus par exemple).

A l'échelle du paysage

Les impacts dépendent de l'espèce d'arbre plantée, des espèces natives présentes sur le site de la plantation et dans l'environnement, du (ou des) transgène(s) et de ses effets. Par exemple, les risques et les impacts sont variables mais on peut formuler les hypothèses que :
- le risque de diffusion de transgènes est moindre si l'espèce transgénique est d'une espèce ou mieux d'un genre exotique à la botanique locale, et donc sans lien génétique avec elle ;
- le risque de perturbation du fonctionnement est moindre s'il n'y a pas de modification des interactions biotiques (par exemple suppression de la compétition trophique entre espèces d'insectes) ;
- l'impact sera plus important si le transgène est susceptible de provoquer des effets en cascade (modification d'une chaîne alimentaire ou d'un équilibre prédateur-proie par exemple) ;

Ainsi, les impacts sur la biodiversité sont forts mais pourraient être amoindris par un aménagement et une délinéation intelligente des plantations cantonnant les arbres transgéniques et interférant le moins possible avec les processus fonctionnels organisant le paysage. Les modalités restent toutefois à préciser et à valider scientifiquement.

© WWF-Canon / M. Gunther

Le modèle de plantation clonale (ici d'Eucalyptus au Brésil) conduit déjà à un appauvrissement drastique de la biodiversité

A l'échelle du temps

Les échelles temporelles à considérer doivent être les plus longues possibles, une libération d'un arbre transgénique et la diffusion du transgène pouvant conduire à des problèmes seulement après plusieurs générations. Plusieurs générations d'arbres signifient des décennies ou siècles, ce qui est fort différent des échelles généralement considérées en laboratoire ou en agriculture.

Est-on capable de suivre à long terme les risques ?

Les arbres transgéniques implantés dans la nature (essais en champ et commercialisation) doivent être suivis afin de pouvoir contrôler leur évolution et leur impact.

Si les essais en champ expérimentaux soumis à autorisation sont suivis à court terme par l'équipe de recherche qui travaille dessus, on peut douter de la capacité de la recherche à suivre plus d'une décennie une plantation expérimentale. Les difficultés de financement des sites ateliers et autres sites d'expérimentation à long terme, en France notamment, montrent bien les limites du possible. Les dispositifs expérimentaux les plus anciens en matière forestière ne dépassent guère le départ du thésard (après 3 ans), la fin du financement européen (après 3 ans) ou, cas exceptionnel, le départ en retraite du chercheur (après 20 ans).

La question est tout autre dans l'application commerciale à grande échelle. Dans le monde forestier d'aujourd'hui, qui dispose de moyens informatiques notamment si puissants et répandus, force est de constater que, même en France, la mémoire des forêts, plans d'aménagement et plantations est moins bonne qu'au XIXe siècle ! Sommiers et cahiers de pépinière disparaissent au profit de fichiers périmés ou de bases de données inaccessibles ou non mises à jour.

En matière de suivi de plantation transgénique, la Chine donne un exemple très concret et illustratif des carences auxquelles il faut s'attendre (lire page 20).

Est-on capable d'évaluer les risques sur la nature ?

Avant de commercialiser les arbres transgéniques de nombreux pays réalisent des essais en champ afin d'évaluer l'intérêt commercial du matériel végétal produit et parfois d'évaluer certains des risques énoncés ci-dessus. Notons toutefois que :
- les études d'impacts sont rares ;
- elles sont difficiles à réaliser à cause du temps de génération des arbres. Pour être sérieuses et fiables, elles doivent durer plusieurs décennies, ce qui n'est jamais le cas ;
- elles sont difficiles à réaliser par la nature même des problèmes générés par la libération d'arbres génétiquement modifiés dans la nature. Pour être sérieuses et fiables, les études d'impacts doivent être réalisées ou faire discuter des équipes pluridisciplinaires allant bien au-delà des seuls spécialistes de la trangenèse (écologie fonctionnelle, biodiversité, entomologie, pédologie, voire les sciences humaines…).

Aucune recherche sur les impacts d'un arbre transgénique ne se donne l'objectif ou les moyens d'une telle évaluation intégrée.

© WWF-Canon / E. Parker

Une plantation industrielle d'Eucalyptus non transgéniques, âgée de 20 ans, au Brésil.

Evaluation des impacts et risques économiques

Bénéfices potentiels des arbres transgéniques (selon Sedjo, 2005a)

Les avantages économiques annoncés ou recherchés des arbres transgéniques sont :
- la diminution des coûts de production pour l'industriel ;
- l'augmentation de la productivité des plantations ;
- la production de bois à des prix plus abordables pour le consommateur.

Selon Sedjo (2004 et 2005), les bénéfices seraient de :
- 152 million de US$ par an aux USA par la réduction des pesticides et herbicides ;
- 1 milliard de US$ pour le monde entier ;
- les papetiers dans le monde gagneraient entre 7,5 et 11 milliards de US$ par an grâce à la réduction de lignine dans le bois.

Toutefois, selon le caractère modifié, les bénéfices et bénéficiaires seront très différents (tableau 4).

Coûts des arbres transgéniques

Les coûts d'investissements pour le développement des arbres forestiers transgéniques sont considérables. Ils se décomposent d'après Sedjo (2005a) en :
- **coût de développement** en laboratoire du matériel transgénique. Ceci est d'autant plus coûteux que les gènes et les méthodes nécessaires sont souvent sous brevets ;
- **coût d'obtention des autorisations** d'essais puis de commercialisation ou de libre circulation dans les pays où les OGM sont soumis à une réglementation. Les procédures peuvent être longues et peuvent nécessiter de nombreux dossiers ;
- **coût de communication** pour contrer l'opposition du public aux OGM. Cela comprend notamment les coûts attachés au maintien de la transparence sur les réalisations, le débat public et les études d'impacts à long terme nécessaires à prouver l'inocuité de l'arbre transgénique développé. Ce dernier coût est considérable, ce qui explique que peu d'études d'impacts crédibles et à long terme sont entreprises ;
- **coût de mise en œuvre** des plantations. Le coût est là identique à une plantation industrielle classique, mais doit inclure le **coût du brevet**.

Ces coûts seront plus faibles dans les pays en voie de développement (coût de main d'œuvre, réglementation souple, faible opposition d'une société mal informée), ce qui laisse envisager une poursuite de la tendance actuelle consistant en :
- un développement de la recherche dans les pays industrialisés (USA, Europe) ;
- un établissement de plantations transgéniques commerciales dans les pays en voie de développement (Chine, Brésil).

Incertitudes et risques induits

Aux rares études d'impact près, l'ensemble des coûts environnementaux potentiels sont externalisés par les industriels. Ils seront subis et pris en charge par la société et les génération futures.

Tableau 4. Estimation des bénéfices possibles selon les innovations (d'après Sedjo 2005a).

Caractère modifié	Bénéfices escomptés	Période du bénéfice escompté	Bénéficiaire
Tolérance aux herbicides	Réduction des herbicides et des coûts de désherbage ; économie potentielle de 350 US$ ou 45% par ha pour des plantations d'Eucalyptus au Brésil	Etablissement de la plantation (3 premières années)	Le propriétaire forestier
Transgène Bt	Réduction des dégâts des ravageurs et de l'utilisation des pesticides	Début et milieu de rotation (1 à 10 ans)	Le propriétaire forestier
Stérilité ou changement dans l'efficience de la reproduction	Augmenter la croissance ; éviter la diffusion de transgène dans la nature	A long terme	Le propriétaire forestier, la société
Amélioration des caractéristiques des fibres	Réduction des coûts du passage en digesteur ; économie potentielle de 10 US$ par m^3	A l'usine	L'industriel
Réduction de la quantité de bois juvénile	Amélioration de la valeur de 15 US$ par m^3	A l'usine	L'industriel
Réduction de la lignine	Réduction du coût de la pâte à papier jusqu'à 15 US$ par m^3	A l'usine	L'industriel
Augmentation de la densité du bois	Amélioration de la résistance des planches	A l'usine	L'industriel

Perception des risques et réactions de la société

Perception par la société

La perception des OGM forestiers est encore faible, même si l'information sur les essais soumis à autorisation est, de par la loi, transparente dans beaucoup de pays (Sedjo, 2004a).

Les différents intervenants de la filière forêt/bois/papier ne perçoivent pas tous de la même façon le développement des arbres et des plantations transgéniques. Il existe en effet des cultures de gestion très variées, des plus proches de la nature aux plus industrielles.

Les sélectionneurs et spécialistes des plantations industrielles ont plutôt une attitude positive face aux arbres transgéniques, même si nombreux sont ceux qui critiquent :
- l'absence de suivi réel sur le terrain, comme le montre le cas de la Chine ;
- la possibilité, comme aux USA, de déréglementation totale d'un arbre transgénique en vue de sa commercialisation.

Les planteurs et propriétaires cultivateurs forment une catégorie très hétérogène. Ceux désirant le plus utiliser les arbres transgéniques sont les grands groupes industriels gérant directement des plantations. S'ils recherchent les avantages économiques et industriels potentiels, ils sont toutefois également transformateurs et vendeurs de produits finis (comme le papier). Aussi sont-ils réticents à s'engager tant que l'opinion publique reste négative. C'est pourquoi même la recherche est essentiellement effectuée par des universités, des organismes de recherche et des entreprises spécialisées en R&D, plutôt que par les industriels eux-mêmes.

Les consommateurs de produits finis ne sont pas conscients des enjeux des OGM forestiers. De plus, si l'opinion face aux cultures transgéniques est plutôt négative, le bois transgénique ne présente pas une opposition aussi franche que les produits transgéniques alimentaires, car cela ne met pas directement leur santé en danger. L'opinion du grand public dépend pour l'instant plus de considérations environnementales et philosophiques que d'une réelle connaissance des enjeux forestiers.

Les ONG de protection de la nature font front commun face au développement d'arbres transgéniques, mais certaines reconnaissent – avec une vision locale maladroite – l'intérêt potentiel pour la conservation des espèces menacées. En Janvier 2004, une campagne mondiale demandant l'interdiction des arbres transgéniques a été lancée par trois associations finlandaises : People's Biosafety Association, Union of Ecoforestry et les Amis de la terre Finlande. Ces trois groupes environnementalistes ont adressé une pétition, de plus de 300 signatures d'ONG du monde entier, au Forum des Nations Unies sur les Forêts (UNFF). Le but était de demander de condamner l'utilisation des arbres transgéniques pour lutter contre le changement climatique et de ne pas occulter les vraies solutions du problème (réduction des émissions et de la déforestation). Le "Mouvement mondial des forêts tropicales humides » (WRM) consacre également une partie de

son travail d'information à la lutte contre les arbres transgéniques. Considérant que leur développement répond à une logique industrielle d'exploitation forestière ignorant que la solution à la déforestation est dans la mise en place d'une exploitation durable des forêts tropicales semi-naturelles, le WRM s'est joint à la pétition. Le WRM appelle tous les gouvernements, et particulièrement ceux ayant signés le protocole de Kyoto, à interdire la dissémination des arbres trangéniques. Aux Etats-Unis, les participants à la conférence Biodemocracy 2005 (conférence alternative à celle de l'Organisation des Industries Biotechnologiques), ont également adressé une demande de moratoire sur tout arbre transgénique, en juin 2005, à la Convention sur la Diversité Biologique. Devant cette mobilisation associative, différentes instances gouvernementales montrent leur refus du tout OGM (Inf'OGM n°70).

Eléments de droit

Droit et accords internationaux (d'après Inf'OGM n°70)

Aucune législation, internationale ou nationale, ne concerne spécifiquement les arbres transgéniques. Ils sont soumis aux législations couvrant les OGM. Au niveau international, deux législations régulent les OGM :
- la première est la **Convention sur la Diversité Biologique (CBD) avec le protocole de Carthagène**. Adopté en juin 2000 et entré en vigueur en septembre 2003, ce protocole légifère sur les mouvements transfrontières des OGM, en termes de responsabilité, de traçabilité et d'identification. Il permet également de prononcer un moratoire sur l'importation d'une plante OGM pour cause soit de connaissance insuffisante des risques, soit d'un risque avéré ;
- la seconde législation est l'**Accord sur l'application de mesures sanitaires et phytosanitaires de l'OMC** (1995) qui oblige les gouvernements à baser leur législation sur l'évaluation des risques plutôt que sur le principe de précaution. C'est sur la base de cet accord que les Etats-Unis, le Canada, l'Argentine et l'Egypte ont dénoncé le moratoire européen sur les OGM.

Au niveau national ou communautaire, les législations se doivent de répondre aux exigences des législations internationales. A ce jour, aucun pays ne possède de législation spécifique aux arbres transgéniques. La procédure d'autorisation de ces derniers, que ce soit pour des essais en champ ou pour une commercialisation, est donc similaire à celle appliquée à tout OGM, selon la législation nationale.

Droit communautaire en Europe (d'après Cord et Gardland 2002)

En Europe, deux Directives de l'Union traitent de la question des OGM.

La Directive 1990/220/CEE qui requiert, avant tout financement, des provisions pour une évaluation complète des risques et des réponses détaillées concernant les mesures d'urgence et de sécurité.

La Directive 2001/18/CE qui :
- harmonise les principes d'évaluation des risques environnementaux de façon à assurer un prise de décision consistante ;
- améliore la gestion des effets à long-terme, décalés dans le temps ou indirects sur l'environnement et la faune sauvage ;
- crée la possibilité d'un mandat post-marché pour le suivi des OGM ;
- révise les procédures de consultation publique et la transparence de l'information.

Réglementation aux Etats-Unis

Aux USA, les industriels peuvent demander une dérégulation d'un OGM, ce qui lui donne un statut de produit non soumis à la réglementation. Ainsi, ils ne doivent plus obtenir d'autorisation pour la circulation de l'OGM en question. Pour cela, les industriels doivent présenter des résultats d'essais en champ à un comité scientifique. Pour le moment, aucun arbre transgénique n'a obtenu ce statut, pour cause de manque de données dans les rapports d'essais (Sedjo, 2004a).

© WWF-Canon / E. Parker

Le FSC exlut clairement les arbres transgéniques des produits certfiés.

Régulation par le marché : l'écocertification

L'écocertification des produits forestiers est destinée à garantir la qualité de la gestion et des pratiques, de la forêt au consommateur. C'est un instrument intéressant pour s'assurer de la traçabilité des produits.

La question de la compatibilité des arbres transgéniques avec les labels de certification a été posée (Coventry, 2001). Seul le FSC exclut clairement l'utilisation d'arbres transgéniques des produits certifiés (principe 6.8). D'autres systèmes les acceptent (SFI) ou ne statuent pas (PEFC). Pour la France, notons qu'au niveau régional certains cahiers des charges PEFC excluent ou incitent à exclure l'usage en champ des arbres transgéniques (simple rappel de la loi). Ceci est toutefois insuffisant pour le consommateur français qui pourrait retrouver à l'avenir sous le même label des produits possiblement transgéniques provenant d'autres pays.

Conclusion et perspectives

Arbres forestiers transgéniques : pour un moratoire immédiat

La logique développée pour le développement et la commercialisation des arbres génétiquement modifiés n'est malheureusement que l'extrême ultime d'une vision productiviste et industrielle de la gestion des forêts.

La biotechnologie des arbres transgéniques crée autant de problèmes épineux et insolubles (comme celui de l'évaluation de l'impact et le suivi à long terme des plantations commerciales), qu'elle ne peut envisager en résoudre. Comme nous l'avons illustré au cours des chapitres précédents, elle ne résout le plus souvent pas le problème à sa racine. Elle conduit par contre à occulter d'autres alternatives plus profitables d'un point de vue écologique, économique et social.

Il est dès lors pertinent de se poser la question de l'intérêt réel, pour la société, d'investir dans les arbres transgéniques en termes d'applications commerciales ?

Le WWF demande une approche usant à tous les stades du principe de précaution en matière d'OGM. Dans le domaine des plantations d'arbres transgéniques, le WWF demande un moratoire immédiat de l'usage ou de la libération d'arbres transgéniques dans les espaces naturels, notamment tant que toutes les interactions écologiques potentielles ne sont pas complètement et sérieusement étudiées et que les mesures de sauvegarde appropriées ne sont pas mises en place. Dans le cas des arbres forestiers transgéniques, cela concerne à la fois le développement des plantations en milieu naturel, mais également les essais en champ qui sont impossibles à confiner.

Ne pas oublier la racine du problème

La gestion des forêts est en profonde évolution depuis les années 1990. Cette évolution conduit à une vision rénovée, plus intégrative et transparente. Cela signifie notamment que le gestionnaire forestier se doit :
- d'une part d'intégrer mieux les acquis des sciences écologiques sur la biodiversité et le fonctionnement de l'écosystème forestier ;
- d'autre part de prendre en compte réellement l'ensemble des enjeux économiques, sociaux et environnementaux à l'échelle du territoire, et suivant des démarches participatives.

Les notions d'écosystème, de biodiversité et de naturalité (Vallauri 2007) ainsi que de services environnementaux progressent sur le terrain, de même que dans les politiques nationales (conférence ministérielle sur la protection des forêts, stratégie nationale pour la biodiversité, plan forestier national) ou sur le marché du bois (écocertification, responsabilité sociale et environnementale des entreprises).

Toutefois, la vision industrielle et productiviste (et, *in fine*, de contrôle de la nature), qui prédomine la gestion forestière mondiale depuis une cinquantaine

© D. Vallauri

S'inspirer du fonctionnement des écosystèmes naturels, une voie plus durable et responsable d'amélioration de la gestion forestière.

d'années perdure également. Elle continue de se développer en parallèle et jusqu'à l'absurde des arbres forestiers transgéniques, économiquement inutiles, écologiquement dangereux, socialement rejetés.

De façon à essayer de paraître écologiquement correct, leurs promoteurs cherchent des justifications par des exemples anecdotiques d'application soit-disant pour la protection de la nature (Saegusa 1998, Da Yuan *et al.* 2002, Holt *et al.* 2004, Rojas *et al.* 2005).

Vers un New Deal écologique ?

Les industriels, notamment les papetiers, sont les principaux demandeurs et bénéficiaires du développement des arbres transgéniques, de façon à améliorer la production de leurs plantations ou de leurs usines.

Les plantations industrielles telles que développées classiquement depuis les années 50 présentent des impacts environnementaux et sociaux forts. Elles produisent une part significative des produits forestiers que nous utilisons (papier, meubles). Cette part tend à augmenter suite à la déforestation et à la gestion non durable des ressources forestières naturelles.

Pour progresser réellement, il nous semble que l'industriel doit reconnaître :
- qu'une plantation industrielle est écologiquement très pauvre en comparaison avec la forêt ou le milieu naturel qu'elle remplace généralement ;

- que sa responsabilité environnementale est engagée en matière par exemple de consommation en eau, de perte de biodiversité, de libération d'espèces invasives ou de transgènes… ;
- que sa responsabilité sociale est forte, vis-à-vis des populations locales vivants dans les paysages de plantations, mais également vis-à-vis des consommateurs des produits (éducation au recyclage, à une consommation responsable…).

Aujourd'hui, certains industriels dans le monde reconnaissent que des améliorations réelles sont nécessaires et réalisables. Ces améliorations ne sont plus perçues négativement mais comme favorables à une développement durable de leurs activités. Ils tendent à mettre en oeuvre notamment par exemple :
- une amélioration réelle de l'intégration des plantations dans le territoire (à l'échelle du paysage) ;
- une prise en compte des enjeux écologiques et des multiples fonctions des paysages boisés (Sayer et Maginnis 2005, Mansourian *et al.* 2005) ;
- la réduction significative de l'empreinte écologique des plantations industrielles au travers de la réduction des pollutions (herbicides, pesticides…) et des ressources mobilisées (eau, nutriments, énergie) ;
- une amélioration de l'impact social des grandes plantations industrielles.

Quant à lui le citoyen consommateur doit reconnaître :
- l'importance des plantations industrielles pour la production des biens qu'il demande ;
- sa responsabilité individuelle vis-à-vis des produits forestiers qu'il consomme (achat responsable et certification), ne recycle pas toujours à 100%, voire gaspille (sur-consommation) ;

© K-A Larsson / WWF

Si la biodiversité doit être mieux prise en compte par les industriels dans les plantations, la réduction des gaspillages et l'augmentation du recyclage dépend notamment des consommateurs.

Cette reconnaissance des problèmes et des solutions est de nature à réconcilier les industriels et les forestiers avec les citoyens. Elle est possible notamment par l'entremise de l'amélioration réelle et constante de la gestion forestière par des systèmes crédibles de certification des produits forestiers, comme le FSC. Cette voie semble plus prometteuse en vue d'un développement durable des industries du bois et du papier.

Dans cette perspective d'avenir, les plantations industrielles d'arbres forestiers transgéniques s'avèrent une voie obsolète et un risque inutile. Le WWF sera particulièrement vigilant sur l'évolution des réalisations sur ce sujet, notamment en France.

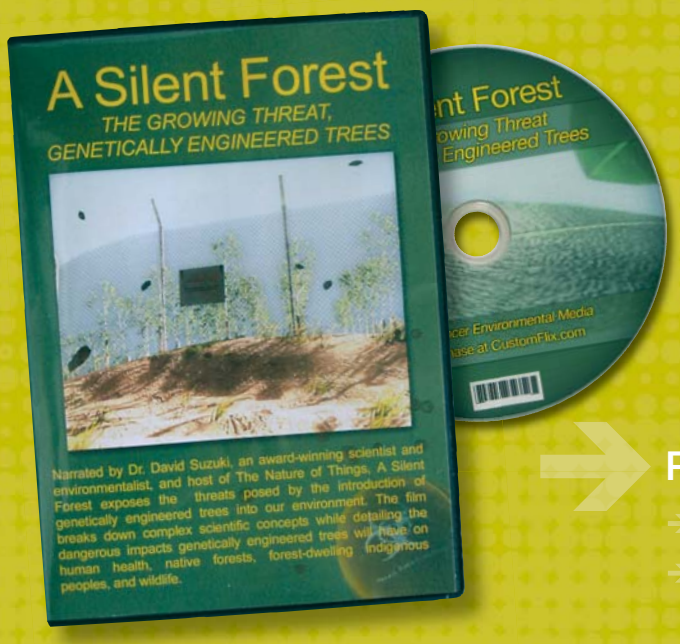
DVD en anglais

Une forêt silencieuse

« A Silent Forest: The Growing Threat of Genetically Engineered Trees » est le film de référence sur les arbres transgéniques, leurs utilisations en plantation forestière industrielle ou en arboriculture.

Il a été primé aux USA. Narré par le Dr. David Suzuki, scientifique canadien spécialiste en génétique et environnementaliste, le film expose en 46', dans un langage compréhensible par le non scientifique, les menaces de l'introduction des arbres génétiquement modifiés dans les milieux naturels.

Le film explique simplement la complexité des concepts scientifiques de la génétique, il montre par des exemples l'impact déjà réel localement (exemple sur les arbres fruitiers à Hawaii) et enfin envisage l'ampleur des impacts que la généralisation des plantations d'arbres transgéniques auraient sur la santé humaine, les forêts naturelles, les peuples indigènes et la faune sauvage.



Pour commander

- raindancerfilms@yahoo.com
- www.raindancermedia.org

Références

Les références bibliographiques ci-dessous comprennent toutes celles citées dans le texte, ainsi que d'autres qui pourraient être utiles au lecteur pour poursuivre l'analyse.

Adams, J.M., Piovesan G., S. Strauss, and S. Brown, 2002. The case for genetic engineering of native and landscape trees against introduced pests and diseases. Conserv. Biol. 16:874–879.

Allen, J.A., Chambers J.L., Stine M. 1994. Prospects for increasing the salt tolerance of forest trees: a review. Tree Physiol. 14:843-853.

Balocchi, C. and Valenzuela, S. 2004. Introduction to GMOs and Biosafety in Forestry. In: Kellison R., Mc Cord S., Gartland K. Forest biotechnology in Latin America, Proceedings of the Forestry Biotechnology Workshop, Global Biotechnological Forum. (2-5 March, 2004, Concepción, Chile), p. 85-96.

Baucher M, Petit-Conil M, Boerjan W, 2003. Lignin: genetic engineering and impact on pulping. Crit Rev Biochem Mol Biol, 38:305-350.

Bauen *et al.* 2003. A Blue Print for Bioelectricity in the OECD. Report of the Imperial College et E4tech for WWF.

Berthelot A., Chantre G. 2004. La peupleraie française : un maillon essentiel de la filière bois : Le peuplier à l'ère génomique. Biofutur 247 : 20-23.

Bizily SP., Rugh CL., Summers AO., Meagher RB. 1999. Phytoremediation of methylmercury pollution: merB expression in Arabidopsis thaliana confers resistance to organomercurials. Proc Natl Acad Sci USA, 96:6808-6813.

Boerjan W. 2005. Biotechnology and the domestication of forest trees. Plant biotechnology 16:159-166.

Brockerhoff E.G., Liebhold A.M., Jactel, H. 2006. The ecology of forest insect invasions and advances in their management. Can. J. For. Res. 36: 263–268.

Brunner AM, Li J, DiFazio SP, Shevchenko O, Montgomery BE, Mohamed M, Wei H, Ma C, Elias A, Van Wormer K, Strauss SH, 2007. Genetic containment of forest plantations. Tree Genetics and Genomes, 3(2): 75-100.

Brunner AM, Nilsson O, 2004. Revisiting tree maturation and floral initiation in the poplar functional genomics era. New Phytol, 164:43-51.

Burley, J. 2001. Genetics in sustainable forestry: the challenges for forest genetics and tree breeding in the new millennium. Canadian Journal of Forest Research, 31(4) : 561-565.

Byram T. D., Myszewski J. H., Gwaze D. P., Lowe W. J., 2005. Improving wood quality in the western gulf forest tree improvement program: the problem of multiple breeding objectives. Tree Genetics & Genomes 1: 85–92

Byram, T.D., Mullin, T.J., White, T.L., van Buijtenen, J.P. 2005 The Future of Tree Improvement in the Southeastern United States: Alternative Visions for the Next Decade. Southern Journal of Applied Forestry, 29(2) : 88-95.

Campbell MM., Brunner AM., Jones HM., Strauss SH., 2003. Forestry's fertile crescent: the application of biotechnology to forest trees. Plant Biotechnology Journal 1, 141–154.

Carle, J., Vuorinen, P., & Del Lungo, A., 2002. Status and trends in global forest plantation development. Journal of Forest Products, 52(7), 12-13.

Carson, M., Walter, C., Walter, S., 2004. The future of forest biotechnology. In R. Kellison, S. McCord, & Kevan M.A. Gartland (Eds.), Forest biotechnology in Latin America. Raleigh, NC: Institute for Forest Biotechnology, pp.13-40.

Charman, 2005. The shape of forests to come? World watch magazine, may/june.

Che D., Meagher R.B., Heaton A.C.P., Lima A., Rugh C.L., Merkle S.A. 2003. Expression of mercuric ion reductase in Eastern cottonwood (Populus deltoides) confers mercuric ion reductase and resistance. Plant Biotechnol J, 1:311-319.

Chen C., Baucher M., Christensen J.H., Boerjan W. 2001. Biotechnology in trees: towards improved paper pulping by lignin engineering. Euphytica 118 : 185–195.

Chiang V.L., 2004. Biotechnology applied to wood properties. In: Kellison, R.; Mccord, S. And Gartland, K. Proceedings of the Forestry Biotechnology Workshop, Global Biotechnological Forum. (2-5 March, 2004, Concepción, Chile), pp. 117-123.

Clayton, M. 2005. Now, bioengineered trees are taking root. The Christian Science Monitor 10 March 2005.

Confalonieri M, Balestrazzi A, Bisoffi S, Carbonera D. 2003. In vitro culture and genetic engineering of Populus spp.: synergy for forest tree improvement. Plant Cell Tissue Organ Cult;72:109–38.

Cossalter C., Pye-Smith C. 2003. Fast-Wood Forestry. Myths and realities. Cifor, 50 pages.

Coventry, P. 2001. Forest Certification and Genetically Engineered Trees: Will the two ever be compatible ? Oxford: Oxford Forestry Institute, Occasional paper n°53.

Da-Yuan Chen, Duan-Cheng Wen, Ya-Ping Zhang, Qing-Yuan Sun, Zhi-Ming Han, Zhong-Hua Liu, Peng Shi, Jin-Song Li, Jing-Gong Xiangyu, Li Lian, Zhao-Hui Koua, Yu-Qi Wu, Yu-Cun Chen, Peng-Yan Wang & He-Min Zhang. Interspecies Implantation and Mitochondria Fate of Panda-Rabbit Cloned Embryos. Biology of Reproduction, 67:637-42, 2002.

Di Fazio, S.P., Gancho, T.S., Burczyk, J., Leonardi, S., & Strauss, S.H. 2004. Gene flow from tree plantations and implications for transgenic risk assessment. In C. Walter & M. Carson (Eds.), Plantation forest biotechnology for the 21st century. Kerala, India: Research Signpost.

Di Fazio SP. 2002. Measuring and modeling gene flow from hybrid poplar plantations: implications for transgenic risk assessment. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis http://www.esd.ornl.gov/PGG/difaz_thesis.pdf

Dinus, R.J., Payne P., Sewell M., Chiang V.L., and Tuskan G.A. 2001. Genetic modification of short rotation popular wood: Properties for ethanol fuel and fiber productions. Critical Reviews in Plant Sciences 20(1):51-69.

Egea-Cortines, M., Weiss, J. 2001. A rapid coming of age in tree biotechnology. Nat. Biotechnol. 19:215–216.

El-Lakany, M.H., 2004. Are genetically modified trees a threat to forests? Unasylva, 55(217) : 45-47.

Erikson, M.E.; Israelsson, M.; Olsson, O. And Moritz, T., 2000. Increased giberellin biosynthesis in transgenic trees promotes growth biomass production and xylem fiber length. Nature Biotechnology, 18(7) : 784-788.

Farnum P., Lucier A. and Meilan R. 2007. Ecological and population genetics research imperatives for transgenic trees. Tree Genetics and Genomes 3(2) : 119-133.

Finstad K, Shearer W, Bonfils A-C, MacDonald P. 2007. Trees with novel traits in Canada: regulations and related scientific issues. Tree Genet Genome 3 :135-139.

Fladung M, Nowitzki O, Ziegenhagen B, Kumar S. 2003. Vegetative and generative dispersal capacity of field released transgenic aspen trees - Trees-Structure and Function, 17(5) :412-416.

FAO, 2004. Preliminary review of biotechnology in forestry: Including genetic modification (Forest Genetic Resources Working Paper). Rome: Forestry Department, FAO.

Gallais, A., Ricroch A. 2006. Plantes transgéniques : faits et enjeux. Editions Quae, Versailles, 304 pages.

Gartland, K.M.A., R.M. Crow, T.M. Fenning, Gartland, J.S. 2003. Genetically modified trees: Production, properties, and potential. J. Arboric. 29:259–266

Gartland, Kevan M.A., Gartland, JL. 2004. Biotechnology applied to conservation, insects and diseases. In Robert Kellison, Susan McCord, and Kevan M.A. Gartland (eds.), Forest Biotechnology in Latin America, Proceedings from the Workshop Biotecnologia Forestal, 109–118.

Génissel A., Leplé J-C., Millet N., Augustin S., Jouanin L., Pilate G. 2003. High tolerance against Chrysomela tremulae of transgenic poplar plants expressing a synthetic cry3Aa gene from Bacillus thuringiensis spp. tenebrionis. Mol Breed, 11:103-110.

Ris G., Ellis BE., Isman MB. 2003. Tryptamine-induced resistance in tryptophan decarboxylase transgenic poplar and tobacco plants against their specific herbivores. J Chem Ecol, 29:779-793.

Giri C., Shyamkumar, Anjaneyulu C. 2004. Progress in tissue culture, genetic transformation and applications of biotechnology to trees: an overview. Trees - Structure and Function, 18(2) : 115-135.

Gleeson D., Lelu-Walter MA, Parkinson M. 2005. Overproduction of proline in transgenic hybrid larch (Larix x leptoeuropaea (Dengler)) cultures renders them tolerant to cold, salt and frost. Molecular Breeding, 15: 21–29

Grace L.J., Charity J.A., Gresham B., Kay N., Walter C. 2005. Insect-resistant transgenic Pinus radiata. Plant Cell Rep 24:103–111.

Halpin C., Boerjan W. 2003. Stacking transgenes in forest trees. Trends Plant Sci, 8:363-365.

Halpin C., Thain S.C., Tilston E. L., Guinery E., Lapierre C., and Hopkins D.W. 2007. Ecological impacts of trees with modified lignin. Tree Genetics & Genomes 3:101–110.

Hampp, R., Ecke, M., Schaeffer, C., Wallenda, T., Wingler, A., Kottke, I., and Sundberg, B. 1996. Axenic mycorrhization of wild type and transgenic hybrid aspen expressing T-DNA indoleacetic acidbiosynthetic genes. Trees 11:59-64.

Han K.H., Keathley D.E., Davis J.M., Gordon M.P. 1993. Regeneration of a transgenic woody legume (Robinia pseudoacacia L., black locust) and morphological alterations induced by Agrobacterium rhizogenes-mediated transformation. Plant Sci 88: 149–157

Hawkins S., Leple´ J-C, Cornu D., Jouanin L., Pilate, G. 2003. Stability of transgene expression in poplar: a model forest tree species. Ann For Sci, 60:427-438.

Hayes JP. 2001. Biodiversity implications of transgenic plantations. Proceedings of the first international symposium on ecological end societal aspects of transgenic plantations, S.H. Strauss and H.D. Bradshaw, pp168-175.

Hinchee M. 2005. The benefit of the applications of forest biotechnology. IUFRO Tree Biotechnology, http://iufro.up.ac.za/

Ho Mae Van, Cummins J. 2004. GM Forest Trees. The Ultimate Threat. www.gmfreeireland.org

Hoenicka H., Fladung M. 2006. Biosafety in Populus spp. and other forest trees: from non-native species to taxa derived from traditional breeding and genetic engineering. Trees 20:131–144.

Holt W. Pickard, A., Prather, R. 2004 Wildlife conservation and reproductive cloning. Reproduction, 127:317-24.

Hu L., Lu H., Liu Q., Chen X., Jiang X. 2005. Overexpression of mtlD gene in transgenic Populus tomentosa improves salt tolerance through accumulation of mannitol. Tree Physiol 25: 1273-1281.

Huntley SK., Ellis D., Gilbert M., Chapple C., Mansfield SD. 2003. Significant increases in pulping efficiency in C4H-F5Htransformed poplars: improved chemical savings and reduced environmental toxins. J Agric Food Chem, 51:6178-6183.

Igasaki T., Mohri T., Ichikawa H., Shinohara K. 2000. Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation of Robinia pseudoacacia. Plant Cell Rep 19: 448–453

Israelsson M., Eriksson M.E., Hertzberg M., Aspeborg H., Nilsson P., Moritz T. 2003. Changes in gene expression in the wood-forming tissue of transgenic hybrid aspen with increased secondary growth. Plant Mol Biol, 52:893-903.

Jactel H., Menassieu P., Vetillard F., Gaulier A., Samalens J.C., Brockerhoff E.G. 2006. Tree species diversity reduces the invasibility of maritime pine stands by the bast scale, Matsucoccus feytaudi (Homoptera: Margarodidae). Can. J. For. Res. 36: 314–323.

Jing Z.P., Gallardo F., Pascual M.B., Sampalo R., Romero J., Torres de Navarra A., Canovas DM. 2004. Improved growth in a field trial of transgenic hybrid poplar overexpressing glutamine synthetase. New Phytol, 164:137-145.

Kaldorf, M. Fladung, M., Muhs, H.J., Buscot, F. 2002. Mycorrhizal colonization of transgenic aspen in a field trial. Planta 214, 653-660.

Kawaoka A., Matsunaga E., Endo S., Kondo S., Yoshida K., Shinmyo A., Ebinuma H. 2003. Ectopic expression of a horseradish peroxidase enhances growth rate and increases oxidative stress resistance in hybrid aspen. Plant Physiol, 132:1177-1185.

Kellison, R., Mc Cord, S. 2004. New Century, New Trees: Biotechnology as a Tool for Forestry in North America

Kellison R., Mc Cord S., Gartland K. 2004. Forest biotechnology in Latin America, Proceedings of the Forestry Biotechnology Workshop, Global Biotechnological Forum. (2-5 March, 2004, Concepción, Chile).

Klimaszewska K, Lachance D, Pelletier G, Lelu MA, Seguin A. 2001. Regeneration of transgenic Picea glauca, P. mariana, and P. abies after cocultivation of embryogenic tissue with Agrobacterium tumefaciens. In Vitro Cell Dev Biol Plant 37:748–55.

Klimaszewska K., Rutledge RG., Seguin A. 2004. Genetic transformation of conifers utilizing somatic embryogenesis. In: Pena L, editor. Methods in molecular biology, vol. 286. Totowa, NJ: Humana Press. p. 151–64.

Koehler L., Telewski F.W. 2006. Biomechanics and transgenic wood. American Journal of Botany, 93:1433-1438.

Krishna P. J. 2003. Transgenic aspen trees with altered lignification: good news for pulp and paper industry. ISB News Report.

Lachance D., Hamel L.-P., Pelletier F., Valéro J., Bernier-Cardou M., Chapman K, van Frankenhuyzen K., Séguin A. 2007. Expression of a Bacillus thuringiensis cry1Ab gene in transgenic white spruce and its efficacy against the spruce budworm (Choristoneura fumiferana). Tree Genetics & Genomes 3:153–167

Laestadius, S. 2000: Biotechnology and the potential for a radical shift of technology in forest industry. Technology Analysis & Strategic Management 12(2): 193-212.

Lapierre, C., Pollett B., Petit–Conil, M., Toval, G., Romero, J., Pilate, G., Leple, J.C., Boerjan, W., Ferret, V., De Nadai, V., Jouanin L. 1999. Structural alterations of lignins in transgenic poplars with depressed cinnamyl alcohol dehydrogenase or caffeic acid O–methyl transferase activity have an opposite impact on the efficiency of industrial kraft pulping. Plant Physiol. 119:153–163.

Lelu-Walter MA. and Harvengt L, 2004. L'embryogenèse somatique des conifères, état et perspectives. Fiche informations-forêt INRA n°694.

Lemmetyinen J, Sopanen T., 2004. Modification of flowering in forest trees. In: Kumar S, Fladung M (eds) Molecular genetics and breeding of forest trees. Haworth, New York, pp 263–292

Leple JC, Brasileiro ACM, Michel MF, Delmotte F, Jouanin L., 1992. Transgenic poplars: expression of chimeric genes using four different constructs. Plant Cell Rep. 11:137–41.

Li L., Zhou Y., Cheng X., Sun J., Marita J.M., Ralph J., Chiang V. 2003. Combinatorial modification of multiple lignin traits in trees through multigene cotransformation. Proc Natl Acad Sci USA, 100:4939-4944.

Liang H.Y., Catranis C.M., Maynard C.A., Powell W.A. 2002. Enhanced resistance to the poplar fungal pathogen, Septoria musiva, in hybrid poplar clones transformed with genes encoding antimicrobial peptides. Biotechnol. Lett., 24:383–9.

Linacre N.A., Ades P.K. 2004. Estimating isolation distances for genetically modified trees in plantation forestry. Ecol Model 179:247–257

Main, G.D., Williamson, A., Irvine, R.J., Gartland, J.S., Fenning, T.M., Mala J., Gartland, K.M.A. 1998. The use of green fluorescent protein (gfp) as a reporter gene in tree genetic manipulations. In Davey, M.R., K.C. Lowe, and J.B. Power. (Eds.). Tree Biotechnology Towards the Millennium. Nottingham University Press, UK, pp 315–320.

Mansourian S., Vallauri D., Dudley N. (eds.) 2005. Forest restoration in landscapes. Beyond planting trees. Springer, New-York, 437 pages.

Mathews, J.M. And Campbell, M.M., 2000. The advantages and disadvantages of the application of genetic engineering to forest trees: a discussion. Forestry, 73(4):372-380.

Mc Cord S., Gartland K. 2002. Forest biotechnology in Europe: the challenge, the promise, the future.

Meilan R., Auerbach D.J., Ma C., Di Fazio S.P., Strauss S.H. 2002. Stability of herbicide resistance and GUS expression in transgenic hybrid poplars (Populus sp.) during four years of field trials and vegetative propagation. HortScience, 37:277-280.

Meilan, R., Brunner, A., Skinner, J., Strauss, S. 2001. Modification of flowering in transgenic trees. In A. Komamine and N. Morohoshi [eds.]. Molecular breeding of woody plants, Progress in biotechnology series, pp. 247–256.

Meirmans P., Gros-Louis M-C., Lamothe M., Guigou G., Khasa D., Bousquet J., Isabel N. 2005. Evaluation of gene flow between exotic and native tree species. Poster at IUFRO Tree Biotechnology 2005 meeting, Pretoria, South Africa, 6–11 November 2005.

Mentag R., Luckevich M., Morency M-J., Séguin A. 2003. Bacterial disease resistance of transgenic hybrid poplar expressing the synthetic antimicrobial peptide D4E1. Tree Physiol, 23:405-411.

Millenium ecosystem assessment 2005. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. Chapter 4. Biodiversity. Island Press, 79-122.

Mouradov, A., Teasdale, R.D. 1999. Genetic engineering of reproductive incompetence in radiata pine. Protoplasma 208:13–17.

Noël A., Levasseur C., Van Quy Le, Séguin A. 2005. Enhanced resistance to fungal pathogens in forest trees by genetic transformation of black spruce and hybrid poplar with a Trichoderma harzianum endochitinase gene. Physiological and Molecular Plant Pathology 67:92–99.

Pappinen A., Degefu Y., Syrjala L., Keinonen K., von Weissenberg K. 2002. Transgenic silver birch (Betula pendula) expressing sugarbeet chitinase 4 shows enhanced resistance to Pyrenopeziza betulicola. Plant Cell Rep., 20:1046–51.

Park YW, Baba K, Furuta Y, Iida I, Sameshima K, AraiM, Hayashi T, 2004. Enhancement of growth and cellulose accumulation by overexpression of xyloglucanase in poplar. FEBS Lett, 564:183-187.

Pena L, Séguin A., 2001. Recent advances in the genetic transformation of trees. Trends Biotechnol., 19:500–6.

Pilate G, Guiney E, Holt K, Petit-Conil M, Lapierre C, Leplé J-C, Pollet B, Mila I, Webster EA, Marstorp HG. 2002. Field and pulping performances of transgenic trees with altered lignification. Nat Biotechnol, 20:607-612.

Pilate G., Dejardin A., Cornu D., Leple J-C. 2004, Transgénèse chez le peuplier : apport aux études sur la formation du bois : le peuplier à l'ère génomique. Biofutur 247 : 49-53.

Raemdonck D.V., Jaziri M., Boerjan W., Baucher M. 2001. Advances in the improvement of forest trees through biotechnology. Belg J Bot 134(1):64–78

Rockwood D.L., Naidu C.V., Carter D.R., Rahmani M., Spriggs T.A., Lin C., Alker G.R., Isebrands J.G., Segrest S.A. 2004. Short-rotation woody crops and phytoremediation: opportunities for agroforestry ? Agrofor Syst 61:51–63

Rojas, M., Venegas, F., Montiel, E., Servely, J.L., Vignon, X. & Guillomot, M. 2005. Attempts at applying cloning to the conservation of species in danger extinction. Int. J. Morphol., 23(4):329-336.

Rongwen J., Akkaya M.S., Bhagwat A.A., Lavi U., Cregan P. 2003. Forest Tree Transgenesis and Functional Genomics: From Fast Forward to Reverse Genetics. Silvae Genetica 52 5-6:229-232.

Rugh, C.L., Senecoff J.F., Meagher R.B., Meikle, S.A. 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. Nat. Biotechnol. 16:925–928.

Saegusa, A. 1998. A. Mother bears could help save giant panda. Nature,394:409

Sayer J., Maginnis S. (eds.) 2005. Forests in landscapes. Earthscan, UK., 257 pages.

Sederoff R. 2007. Regulatory science in forest biotechnology. Tree Genetics & Genomes 3:71–74.

Sederoff, R. 1999. Building better trees with antisense. Nat. Biotechnol. 17:750–751

Sedjo, R.A. 2004a. Genetically engineered trees: Promise and concern. RFF Report, Washington, DC: Resources for the Future.

Sedjo, R.A. 2004b. Transgenic Trees: Implementation and Outcome of the Plant Protection Act. RFF Discussion Paper 04-10, Washington DC.

Sedjo, R.A. 2005a. Will Developing Countries be the Early Adopters of Genetically Engineered Forests? AgBioForum, 8(4): 205-212.

Sedjo, R.A. 2005b. Genetically engineered forests: Financial and economic assessment to the future (draft report). Rome: FAO.

Sedjo, R.A. 2005c. Global agreements and U.S. forestry: Genetically modified trees. Journal of Forestry, 103(3), 109-113.

Seppala, R. 2003. Forest biotechnology and the global forest sector. In S. McCord & K. Gartland (Eds.), Forest biotechnology in Europe: The challenges, the promise, the future . Raleigh, NC: Institute for Biotechnology, pp. 39-43.

Shani Z., Dekel M., Tsabary G., Goren R., Shoseyov O. 2004. Growth enhancement of transgenic poplar plants by overexpression of Arabidopsis thaliana endo-1,4-b-glucanase (Cel1). Mol Breed, 14:321-330.

Skinner J.S., Meilan R., Ma C., Straus S.H. 2003. The Populus PTD promoter imparts floral-predominant expression and enables high levels of floral-organ ablation in Populus, Nicotiana and Arabidopsis. Mol Breed, 12:119-132.

Slavov G.T., Di Fazio S.P., Strauss S.H. 2004 Gene flow in forest trees: gene migration patterns and landscape modelling of transgene dispersal in hybrid poplar. In Introgression from genetically odified plants into wild relatives (eds.H.C.M. den Nijs, D. Bartsh and J. Sweet), pp 89-106.

Smouse P.E., Robledo-Arnuncio J.J., González-Martínez S.C. 2007. Implications of natural propagule flow for containment of genetically modified forest trees. Tree Genetics & Genomes 3:141–152

Strauss S.H., Brunner A.M., Busov V.B;, Ma C., Meilan R. 2004. Ten lessons from 15 years of transgenic Populus research. Forestry, 77:455-465.

Strauss, S.H., Coventry, P., Campbell, M.M., Pryor, S.N., Burley, J. 2001. Certification of genetically modified forest plantations. Int. For. Rev. 3:87–104.

Strauss, S.H., Knowe, S.A., Jenkins, J. 1997. Benefits and risk of transgenic Roundup Ready cottonwoods. J. For. 95:12–19.

Strauss, S.H., Rottman, W.H., Brunner, A.M., Sheppard, L.A. 1995. Genetic engineering of reproductive sterility in forest trees. Mol. Breed. 1:5–26.

Strohm M., Jouanin L., Kunert K.J., Pruvost C., Polle A., Foyer C.H., *et al.*, 1995. Regulation of glutathione synthesis in leaves of transgenic poplar (Populus tremula _ P. alba) overexpressing glutathione synthetase. Plant J. (7):141–145.

Su, X., Bing-yu, S., Zhang, H.Q., Lie-jian, H., & Xiang-hua, Z. 2003. Advances in tree genetic engineering in China. Paper submitted to the XII World Forestry Congress, Quebec, Canada.

Sykes, M., Yang, V., Blankenburg, J., AbuBakr, S. 1999. Biotechnology: Working with Nature to Improve Forest Resources and Products. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin 53705 1999 International Environmental Conference TAPPI Proceedings

Tang W., Newton RJ. 2003. Genetic transformation of conifers and its application in forest biotechnology. Plant Cell Rep. 22:1–15.

Tang W., Tian Y. 2003. Transgenic loblolly pine (Pinus taeda L.) plants expressing a modified d-endotoxin of Bacillus thuringiensis with enhanced resistance to Dendrolimus punctatus Walker and Crypyothelea formosicola Staud. J Exp Bot, 54:835-844.

Tsai C-J., Podila G.K., Chiang V.L. 1994. Agrobacterium-mediated transformation of quaking aspen (Populus tremuloides) and regeneration of transgenic plants. Plant Cell Rep 14: 94–97

Tuominen H., Sitbon F., Jacobsson C., Sandberg G., Olsson O., Sundberg B., 1995. Altered growth and wood characteristics in transgenic hybrid aspen expressing Agrobacterium tumefaciens T-DNA indoleacetic acid-biosynthetic genes. Plant Physiol 109: 1179–1189

Tzfira, T., Vainstein, A, Altman, A. 1999. rol–Gene expression in transgenic aspen (Populus tremula) plants results in accelerated growth and improved stem production index. Trees Struct. Func. 14:49–54.

Valenzuela, S., Balocchi, C., Rodriguez, J. 2006. Transgenic trees and forestry biosafety. Electron. J. Biotechnol., jun. 2006, 9(3): 335-339

Vengadesan G., Amutha S., Muruganantham M., Prem Anand R. and Ganapathi A. 2006. Transgenic Acacia sinuata from Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation of hypocotyls. Plant Cell Reports 25(11):1174-1180

Walter, C. 2004. Genetic engineering in conifer forestry: technical and social considerations. In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant : 434-441

Wang L., Han Y., Hu J., 2004. Transgenic forest trees for insect resistance. In Kumar S, Fladung M. (ed.) Molecular Genetics and Breeding of Forest Trees. New York: Food Products Press, pp. 243-261.

Wang, H. 2004. The state of genetically modified forest trees in China. In Preliminary review of biotechnology in forestry: including genetic modification (Forest Genetic Resources Working Papers). Rome: Forestry Department, FAO.

Wells B., Hinchhe M., 2004. Forest Biotechnology. In Kellison, R., Mc Cord, S. And Gartland, K. Proceedings of the Forestry Biotechnology Workshop, Global Biotechnological Forum. (2-5 March, 2004, Concepción, Chile), pp 107-110.

Wenck, A.R., Quinn, M. Whetten, R.W. Pullman, G., Sederoff, R. 1999. High-efficiency Agrobacterium-mediated transformation of Norway spruce (Picea abies) and loblolly pine (Pinus taeda). Plant Mol. Biol. 39:407–416.

Williams C.G. 2006a. Landscapes, genomics and transgenic conifers. Springer, Berlin Heidelberg New York, 261 pages.

Williams C.G. 2006b. Opening Pandora's box: governance for genetically modified forests. ISB News Report http://www.isb. vt.edu/news/2006/jan06.pdf

Williams C.G., Davis B.H. 2005. Rate of transgene spread via long-distance seed dispersal in Pinus taeda. For Ecol Manag 217:95–102

Williams, C.G. 2004. Genetically modified pines at the interface of private and public lands: A case study approach. Paper presented at USDA Forest Service, Washington, DC.

Autres ressources et glossaire

Ressources en ligne

Sites Internet

www.forestbiotech.org

www.rff.org

www.arborgen.com

www.infogm.org

www.sierraclub.org/biotech/trees.asp

www.isb.vt.edu/cfdocs/globalfieldtests.cfm

Quelques équipes de recherches (non exhaustif)

- INRA d'Orléans :
gilles.pilate@orleans.inra.fr
http://www.orleans.inra.fr/les_unites/ur_agpf/formation_des_parois_lignifiees

- CIRAD Unité de recherche Diversité génétique et amélioration des espèces forestières :
www.cirad.fr/ur/genetique_forestiere

Glossaire

EST : Expression Sequence Tag , fragment d'ADN complémentaire séquencé de manière systématique et automatisée.

QTL : Quantitative Trait Locus, locus où la variation allélique est associée à la variation d'un caractère quantitatif.

Biolistique : Introduction d'un gène dans une cellule par bombardement de microparticules. Le gène est fixé à des billes microscopiques en tungstène, qui sont projetées à travers la membrane cellulaire à l'aide d'un canon à gène.

Arbre transgénique Bt : l'introduction des gènes responsables de la production de la toxine Bt (Bacillus thuringiensis), toxique pour certains insectes ravageurs, pourrait réduire les dommages aux cultures. Le bacille de Thuringe est couramment employé en pulvérisation. La transgenèse vise à réduire le coût d'application.

Annexe 1
Liste des espèces d'arbres génétiquement modifiées et d'hybrides transgènes

(Compilée par Dr. Neil Carman / Sierra Club Genetic Engineering Committee, 11 mars 2005)

1. *Populus tremula* - 1988
2. *Juglans nigra* - 1989
3. *Carica papaya* - 1991 puis approbation pour des plantation commerciales à Hawaii
4. *Malus domestica* - 1991
5. *Castanea sativa* - 1992
6. *Prunus domestica* - 1992
7. *Eucalyptus camaldulensis* - 1993
8. *Picea mariana* - 1993
9. *Liquidambar styraciflua* - 1994
10. *Prunus domestica* - 1994
11. *Prunus armenica* - 1994
12. *Poncirus trifoliata* - 1994
13. *Citrus sinensis* - 1995
14. *Populus nigra* - 1994 essais en champ ; 1998 plantation à grande échelle en Chine.
15. *Casuarina glauca* - 1996
16. *Betula pendula* - 1996
17. *Castanea dentata* - 1996
18. *Citrus sinensis* - 1996
19. *Eucalyptus globulus* - 1996
20. *Picea abies* - 1996
21. *Pinus sylvestris* - 1996
22. *Acacia sp.* (espèces tropicales) - 1997
23. *Pinus radiata* - 1997
24. *Tectona grandis* - 1997
25. *Citrus aurantifolia* - 1997
26. *Citrus aurantium* - 1997
27. *Citrus grandis* - 1997
28. *Allocasuarina verticiliata* - 1997
29. *Eucalyptus grandis* - 1998
30. *Olea europea* - 1998
31. *Populus deltoides* - 1998
32. *Populus tremuloides* - 1998
33. *Prunus avium* - 1998
34. *Persea sp.*
35. *Coffea arabica* - essais en champ
36. *Citrus paradisi hybrid* (*C. maximum* x *C. sinensis*) - essais en champ
37. *Pyrus communis* - essais en champ
38. *Diospyros species* - essais en champ
39. *Juglans species* - essais en champ
40. *Pinus taeda* - essais en champ
41. *Pseudotsuga menziesii* - essais en champ
42. *Ulmus species* - essais en champ

43. *Actinidia chinensis* - 1999 - essais en champ
44. *Populus tomentosa* - 1999 Chine
45. *Musa acuminata* - 2000 - essais en champ
46. *Hevea brasiliensis* - 2000
47. *Rhododendron sp.* - 2000
48. *Populus trichocarpa* x *P. deltoides* - 2001
49. *Populus trichocarpa* x *P. nigra* - 2001
50. *Populus deltoides* x *P. nigra* - 2001
51. *Populus simonii* x *P. nigra* - 2001
52. *Larix sp.* (*L. decidua*, *L. sibirica*) - Chine
53. *Paulownia species* (*P. tomentosa*, *P. fortunei*)
54. *Juglans regia* - essais en champ
55. *Populus alba* x *P. davidiana* x *P. simonii* x *P. tomentosa* - 2001 Chine
56. *Eucalyptus occidentalis* - 2002
57. *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* - 2002
58. *Betula platyphylla* - Chine
59. *Santalum album* -
60. *Fagus sylvatica* -
61. *Citrus reticulata* - 2002
62. *Populus tremula* x *P. tremuloides* - 2004
63. *Ulmus americana* - 2004

Maquette : Bertrand Dubois
Impression : Pure Impression

FSC
Sources mixtes
Groupe de produits issu de forêts bien gérées, de sources contrôlées et de bois ou fibres recyclés
www.fsc.org Cert no. FCBA-COC-000077
© 1996 Forest Stewardship Council

Les arbres forestiers transgéniques

Etat des lieux

Résumé. Ce rapport aborde l'artificialisation ultime des forêts. Les arbres forestiers transgéniques font l'objet de recherches et applications en plantation industrielle dans plusieurs pays, y compris en France. Selon leurs promoteurs, la transgenèse permettrait de répondre à tous les problèmes forestiers, par exemple l'augmentation de la croissance, la diminution du taux de lignine, la résistance aux insectes, aux maladies et aux herbicides, la production d'agrocarburants,… En 2008, les essais touchent les cinq continents. Face aux contraintes réglementaires développées en Occident, les essais et applications en champ ont été délocalisées au sud, en Chine et au Brésil. Les arbres forestiers transgéniques présentent un risque incontrôlable de transfert du gène modifié aux populations sauvages ; les interactions avec l'écosystème naturel sont complexes et impossibles à confiner. Les études d'impact sont rares. Le WWF demande un moratoire immédiat sur l'expérimentation en champ sur les arbres forestiers transgéniques.

Transgenic forest trees

A review

Summary. *This report is tackling the uppermost way to artificialize forests. The transgenic forest trees are an object of research and applications for industrial plantation in many countries, France included. For GMO's supporters, transgenesis could solve all forest problems, for example the increase of tree growth, the reduction of lignin level, the resistance to insects, pests and herbicides, the production of agrofuels,… In 2008, field trials are located on the five continents. Facing regulation constraints in Western countries, fields trials and plantations are being localised in developing countries, such as China and Brazil. Transgenic forest trees are presenting a risk of uncontrolled transfer of the transgene to wild tree populations ; the interactions with natural forest ecosystem are complex and impossible to control. The impact studies are scarce. WWF requires an immediate moratory of field tests of transgenic forest trees.*

** for a living planet®*

Daniel Vallauri

WWF-France

Bureau Méditerranée
6 rue des Fabres
F-13001 Marseille
France

Tél. : +33 (0)4 96 11 69 40
Fax : +33 (0)4 96 11 69 49
dvallauri@wwf.fr
Skype : vallauri_daniel

WWF

*pour une planète vivante**

www.wwf.fr