

AMBASSADE DE FRANCE AUX ETATS-UNIS

MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE
CONSULAT GENERAL DE SAN-FRANCISCO

BIOTECHNOLOGIE DE LA FORET

Stéphane ROY

Mai 2002

Rapport de Mission de

Stéphane ROY

Attaché pour la Science et la Technologie¹

¹ Stephane.roy@consulfrance-sanfrancisco.org

RESUME.

Ces dernières années, la biotechnologie dans la filière du bois est devenue un secteur émergeant de l'agro-biotechnologie. Une mission d'étude a été organisée auprès de 3 groupes bien distincts des représentants de la filière forestière (chercheurs universitaires, sociétés d'agro-biotechnologie ayant démarré des programmes de biotechnologie forestière et des partenaires industriels utilisateurs du bois) pour identifier les enjeux et l'impact des biotechnologies sur l'industrie forestière et les défis des avancées technologiques de la biologie moléculaire dans la filière bois. Cette étude montre que la biotechnologie de la forêt est un domaine encore embryonnaire soutenu timidement par des fonds publics. Les laboratoires de recherche sont très bien coordonnés et font participer les laboratoires français, dont l'excellence est reconnue. Dans le même temps, les enjeux sociétaux sont intégrés, alors qu'une opposition commence à se faire entendre.

INTRODUCTION

L'industrie des produits de la forêt est un secteur majeur qui emploie environ 1.4 millions de personnes essentiellement dans les communautés rurales. Les ventes représentaient environ 400 milliards de dollars en 1994 et, avant l'année 2010, la demande mondiale de papier aura augmenté de 50% (actuellement évaluée à 1.5 millions de m³ par an). La production de fibres de bois a augmenté de 100% entre 1970 et 1994 alors que la consommation par habitant a augmenté de 50% dans les pays en voie de développement et de 300% dans les pays développés². Pour faire face à cette demande, une amélioration de la production des forêts est attendue dans les 30 prochaines années ; elle serait essentiellement due à la production conventionnelle d'hybrides de qualité, l'utilisation d'engrais et la sélection de sites de production plus cléments. Ainsi, entre 1980 et 1995 les zones de plantation ont doublé dans les pays en voie de développement et pourraient encore doubler d'ici à 2010.

Dans le même temps, les arbres ayant subi relativement peu de domestication, les manipulations génétiques pourraient avoir un plus grand effet sur les produits forestiers que sur les productions agronomiques. De nouvelles technologies (propagation *in vitro*, transfert de gènes, génomique fonctionnelle) pourraient ainsi amener l'amélioration génétique des arbres à un niveau comparable à ce que l'on peut rencontrer chez les plantes cultivées, même s'il faut contourner les problèmes inhérents aux arbres (genome de grande taille, cycle de reproduction long...). Les promesses de la biotechnologie dans l'industrie forestière sont ainsi nombreuses: amélioration de la croissance, résistance aux maladies et aux herbicides, amélioration de la teneur en cellulose et des propriétés des fibres du bois. Alors que les enjeux rencontrés sont communs à un grand nombre de développements en biotechnologie (propriété intellectuelle, valeur ajoutée des modifications génétiques, aspects réglementaires et sociologiques...), certains sont directement liés à la particularité de l'industrie forestière.

² Source FAO 1997. <http://apps.fao.org>

Une série d'initiative et d'évolutions récentes a permis de dresser les grandes lignes de ce domaine de recherche tel qu'il est abordé aux Etats-Unis. On s'intéressera particulièrement aux enjeux scientifiques, économiques et sociétaux de la biotechnologie de la forêt en s'appuyant sur des entretiens avec des professeurs d'université et des « chief technology Officers » (CTO) de sociétés de biotechnologie émergentes. Ce rapport se base sur une série de missions qui ont été effectuées en 2001 et 2002 dans les lieux suivants :

- Tree Genetic Engineering Research Cooperative, Oregon State University, Corvallis (OR)^{3, 4}
- Institute of Forest Resources⁵, University of Washington, Seattle (WA)^{6, 7}
- Institute of Forest Genetics, USDA, Placerville (CA)^{8, 9}
- Institute of Forest Biotechnology, Research Triangle Park (NC)^{10, 11, 12}
- School of Forest Resources, University of Georgia, Athens (GA)^{13, 14, 15}
- The Institute of Paper Science & Technology, Atlanta (GA)^{16, 17}
- Department of Forestry, North Carolina State University, Raleigh (NC)^{18, 19}
- ArborGen, Summerville (SC)^{20, 21, 22}
- Schatz Center for Tree Molecular Genetics, Pennsylvania State University (PA)^{23, 24}
- Department of Forest Science, Texas A&M University, College Station (TX)^{25, 26}

³ Richard Meilan, meilanr@fsl.orst.edu

⁴ Avril 2001

⁵ <http://www.cfr.washington.edu/research/institute>

⁶ Toby Bradshaw, toby@u.washington.edu

⁷ Mars 2002

⁸ Claire Kinlaw, Director

⁹ Avril 2002

¹⁰ W Steve Burke, Senior Vice-President. Steven_burke@ncbiotech.org

¹¹ Susan McCord, Project Manager susan_mccord@ncbiotech.org

¹² Août 2001

¹³ <http://www.forestry.uga.edu/warnell/html/index.html>

¹⁴ Jeffrey F.D. Dean, Professor, jeffdean@uga.edu

¹⁵ Août 2001

¹⁶ John Cairney, Professor john.cairney@ipst.edu

¹⁷ Août 2001

¹⁸ Ron Sederoff, Professor, ron_sederoff@ncsu.edu

¹⁹ Août 2001

²⁰ Maud Hinchee, Chief Technology Officer mahinch@arborgen.com

²¹ Dawn Parks, Business Development.

²² Août 2001

²³ Bio 2001, San Diego, CA

²⁴ John E. Carlson, Associate Professor. Jec16@psu.edu

²⁵ Bio 1999, Seattle, WA

- Global Forestry, Monsanto, Chesterfield (MS)^{27, 28}
- Biotechnology Products, Westvaco Corp, Summerville (SC)^{29, 30}

1 – ENJEUX SCIENTIFIQUES

Notre but n'étant pas d'analyser dans le détail l'état d'avancement des différents travaux, il nous a paru par contre intéressant de dresser une cartographie des principaux enjeux et des grands thèmes de recherche. Les opportunités scientifiques que peuvent présenter la biotechnologie de la forêt sont au nombre de 3 : domestication des arbres, apports de la génomique et restauration des espèces disparues.

- La domestication améliorera la productivité des forêts et protégera les espaces naturels. Elle passe par le développement de cultures de tissus pour la propagation, la caractérisation des gènes, la découverte de marqueurs génétiques, l'établissement d'une cartographie génétique et la mise en place de bases de données de séquences génétiques.
- Les développements technologiques ont longtemps été freinés par la complexité biologique des arbres. Des recherches approfondies en génomique fonctionnelle sont nécessaires avant de pouvoir transformer une base de données génétiques en technologies commercialement utilisables pour les arbres forestiers. Les connaissances acquises en agro-biotechnologie (résistance aux herbicides et insectes) peuvent d'ores et déjà être facilement transposables. Cependant, les mécanismes génétiques de la croissance des arbres ou de la formation du bois (lignification) sont imparfaitement connus. Ce sont ces gènes qui intéressent les industriels dans un souci de rentabilité (cycle « croissance-récolte » raccourci). En raison de leur croissance rapide et de leur impact économique, plusieurs espèces ont été choisies pour développer des programmes de biotechnologie forestière (peuplier, eucalyptus, pin).
- La restauration des espèces disparues est un corollaire de toutes les avancées faites dans le domaine de la génomique.

A – Propagation in vitro

Développée initialement pour cloner en masse les génotypes les plus intéressants, la propagation *in vitro* par embryogénèse somatique³¹ constitue un outil d'avenir pour le transfert des gènes. Si ces techniques sont facilement applicables aux conifères, elle n'ont pas encore atteint la taille d'un développement économique viable parce que la fréquence de régénération des clones d'intérêt est encore trop faible, le coût du maintien des cultures d'embryons est encore élevé et cette activité est associée à des risques de

²⁶ Claire Williams, Associate Professor. Fax : 409.845.6049

²⁷ Bio 1999

²⁸ Donald Duncan, Director. Fax : 314.737.5535

²⁹ Bio 1999

³⁰ Levis W Handley, Manager, Fax : 843.875.7185

³¹ formation d'un embryon par une cellule autre qu'un gamète

contamination et de perte du pouvoir de régénération. C'est le domaine de recherche principal de l'*Institute of Paper Science and Technology* (Atlanta, GA) qui travaille sur le pin loblolly (production majeure dans le sud est des Etats-Unis) ou de Silvagen au Canada (devenue CellFor). Ils s'attachent particulièrement à améliorer le processus d'embryogénèse somatique en augmentant la qualité des plants, la productivité et les capacités de régénération des arbres. De ce fait, ils sont engagés dans un programme d'expression génique lors de l'embryogénèse au stade naturel³².

B – Génomique

Les apports de la génomique (cartographie génétique, sélection de marqueurs moléculaires, découvertes de nouveaux gènes) accéléreront le processus d'amélioration des espèces forestières d'au moins une décennie. Les gènes potentiels identifiés pour l'amélioration des arbres sont la dominance apicale, l'utilisation des nutriments, la qualité du bois, la résistance aux maladies et aux herbicides et la dégradation du complexe ligno-cellulosique. Pour une grande part, ces gènes doivent encore être caractérisés.

Deux projets académiques se concentrent sur la découverte des gènes dans des arbres forestiers commercialement utiles.

- Une action conduite à *North Carolina State University* pour identifier les EST (expressed sequence tags) associés avec la formation du bois chez le pin loblolly^{33, 34}.
- Le séquençage de la totalité du génome du peuplier (500Mbp) a débuté en 2002 au *Joint Genome Institute*, laboratoire de génomique du *Department of Energy*³⁵ (DoE) à Walnut Creek (CA). Le projet a reçu un budget de 25 millions de dollars pour le séquençage qui devrait être achevé à l'automne 2003, sans promesses pour un financement consécutif, c'est-à-dire pour l'étude de la fonctionnalité des gènes. A l'inverse de ce qui s'est produit pour le génome d'*Arabidopsis*, les outils d'analyse des gènes ne sont pas encore disponibles pour les arbres et les séquences seront disponibles sans que d'excellentes technologies de transfert des gènes aient été développées. Le peuplier restera pour longtemps le seul arbre séquencé, même si l'on parle d'une initiative privée pour le pin et de discussions pour des espèces horticoles (pommier, eucalyptus...)

L'ingénierie génétique appliquée aux arbres résultera en une amélioration rapide des espèces et une combinaison de gènes qui n'est pas atteignable par croisement traditionnels. Les gènes d'intérêt peuvent être divisés en trois catégories :

- Traits agronomiques ou gènes responsables de la croissance. Ces gènes peuvent réduire le coût du bois en domestiquant les arbres (exemple des travaux de Toby

³² http://www.ipst.edu/faculty/faculty_cairney.htm

³³ <http://www.cbc.umn.edu/researchprojects/pine/doe.pine/index.html>

³⁴ Un projet similaire sur le peuplier est conduit en Suède.

³⁵ Dans le cadre de leur programme « Genome to life »

Bradshaw³⁶ sur les gènes de la croissance et de la forme des arbres). Le contrôle de la floraison est une des activités de Steve Strauss³⁷ qui développe une méthode pour générer génétiquement la stérilité et permettre une croissance rapide et une augmentation de la vigueur des arbres.

- Formation du bois et déposition de la lignine : C'est l'un des domaines où les manipulations génétiques auront des conséquences très importantes à la fois économiques et environnementales. En manipulant les gènes impliqués dans la biosynthèse de la lignine et la composition de la lignine, la proportion de cellulose et la quantité de lignine peuvent être modifiées. C'est une des activités conduite à l'IPST qui cherche à comprendre les mécanismes moléculaires qui régulent les différenciation du xylème et les propriétés de la paroi végétale ou qui contrôlent la formation du bois (*Institute for Forest Genetics*). Dans le même temps, les chercheurs de la *Michigan Technological University* (Houghton, MI) en utilisant les techniques antisens ont réussi sur le peuplier à produire 45% moins de lignine et 15% en plus de cellulose chez les Aspens et Jeff Dean³⁸ s'intéresse aux enzymes de la dégradation de la lignine pour en modifier la chimie³⁹ et accélérer le processus de formation du papier⁴⁰. Les aspects inhérents au métabolisme de la lignine intéressent plusieurs groupes académiques dans le monde (y compris en France) et de nombreuses industries. Pas moins de 25 brevets couvrent les gènes de la biosynthèse de la lignine, avec beaucoup de redondances. Les enjeux sont à la fois économiques (retour sur investissement dans un processus à faible valeur ajoutée) environnementaux (résistance des bois dont le contenu a été modifié en lignine, aux insectes, aux pathogènes et aux conditions atmosphériques) et qualitatifs (pour combien la structure, la composition et la quantité de lignine contribuent à la qualité du bois). A ce sujet, la *National Science Foundation* (NSF) finance une projet de 3 ans⁴¹ qui implique Texas A&M, NC State, UC Davis et U of Minnesota.
- Génétique et environnement : les gènes de résistance aux maladies et aux insectes (travaux de Richard Meilan⁴²) et la tolérance aux stress de l'environnement revêtent une grande importance dans le programme de recherche. Une connaissance plus fondamentale des gènes qui contrecarrent les agents physiques ou biologiques est l'œuvre de la *North Central Research Station*⁴³ à Rhinelander (WI) ou de l'*Institute for Forest Genetics* (Placerville, CA). L'*Institute for Forest Genetics* a trois projets dans ce domaine : génétique des maladies et en particulier génétique de l'hôte et les

³⁶ University of Washington

³⁷ Oregon State University

³⁸ University of Georgia

³⁹ Travail similaire chez Clinton Chapple à Purdue University, West Lafayette, IN

⁴⁰ Jeff Dean bénéficie de la plate forme technologique de l'University of Georgia développée par Scott Merkle sur la transformation des plantes.

⁴¹ 4 millions de dollars. Genomics of Wood Formation

⁴² Oregon State University

⁴³ USDA Forest Service

relations avec les agents infectieux et génétique des populations (diminution de la diversité génétique...)

C – Transfert de gènes.

Les premiers conifères transgéniques ont été régénérés au début des années 1990 avec une diversification des techniques de transfert des gènes dans les embryons apparaissant en 1998. Chez les angiospermes, les premiers succès datent aussi des années 1990, avec les premières régénérations de peupliers transgéniques en 2000 et d'eucalyptus transgéniques en 1998. A plus long terme, sont envisagés une expression génique spécifique à certains tissus (ex : seulement dans les feuilles pour la résistance aux insectes)

L'US Department of Agriculture (USDA) APHIS (*Animal and Plant Health Inspection Services*) réglemente les essais sur le terrain de plants transgéniques. Environ une 15 d'essais sont en cours de réalisation⁴⁴ et ces deux dernières années, 52 permis ont été demandés.

Espèce	Phénotype	Etat
Peuplier	Gène marqueur	IA
Peuplier	Résistance aux insectes ▪ Lepidoptères	WI
Peuplier	Tolérance aux herbicides ▪ Glyphosate ▪ Phosphinothricine	OR
Peuplier	Tolérance aux herbicides ▪ Glyphosate	OR
Sweetgum	Tolérance aux herbicides ▪ 2,4D	GA
Noisetier	Résistance aux parasites	CT
Peuplier	Résistance aux insectes ▪ beetles	OR
Peuplier	Résistance aux champignons	OR
Peuplier	Tolérance aux herbicides ▪ glyphosate	OR
Peuplier	Résistance aux virus	WA

2 – ENJEUX ECONOMIQUES

La faiblesse du soutien financier public ou industriel est l'une des caractéristiques de ce domaine de recherche. Les programmes de soutien aux biotechnologies forestières sont plus défavorisés que ceux des autres productions agricoles. On évalue à seulement 1% des ventes l'investissement en R&D fait par les industriels du bois et du papier (contre 15% pour l'industrie pharmaceutique). Pourtant, une grande part de l'industrie forestière américaine doit faire face à un avenir incertain, résultats d'une réduction continue des terrains sur lesquels les arbres peuvent être récoltés pour répondre à des restrictions environnementales et à un développement urbain en croissance. La perte lente

⁴⁴ <http://www.aphis.usda.gov/bbep/bp/>

mais irréversible d'hectares sur lesquels des forêts peuvent être cultivées couplé à une augmentation de la demande de papier et la production de fibres peu onéreuses d'espèces tropicales à croissance rapide exercent une pression intense sur l'industrie américaine pour augmenter le tonnage de bois par hectare. Dans une certaine mesure si les forêts américaines ne peuvent pas atteindre cet objectif de productivité, il est clair que l'importation de fibres et/ou la délocalisation des unités de production à l'étranger constituent un enjeu important pour les zones rurales où la production de bois constitue le moteur économique. L'industrie forestière reste cependant encore sceptique sur les investissements à effectuer dans les techniques moléculaires⁴⁵. A titre d'exemple, les améliorations apportées par l'hybridation conventionnelle sur le pin (*Pinus patula*) a permis une augmentation de 50% de la productivité.

Plusieurs gènes caractérisés auront des implications directes pour l'industrie : inhiber la reproduction à travers le contrôle de la floraison pour rediriger les ressources énergétiques vers la production de bois, mieux comprendre les stress environnementaux pour jouer sur les zones de plantation (latitudes, altitudes). Dans le même temps, la frilosité de l'industrie s'explique aussi par la différence d'intérêt des différents acteurs envers le produit final : papier, fibres, bois... Certaines industries (Westvaco Corp, Summerville, SC) ont un programme en biotechnologie qui remonte au milieu des années 1980. Ce programme implique les technologies de propagation, de transformation génétique et de découverte des gènes pour le contrôle de la floraison, la croissance (acquisition et découverte) et les technologies opérationnelles (clones). Les partenariats sont possibles pour accéder à la technologie, aux gènes et aux sites de test.

L'industrie est pourtant présente dans certaines institutions académiques. Par exemple, l'IPST d'Atlanta (GA) a été créé sur la base d'un concept datant des années 1920 qui sert les intérêts de l'industrie du papier et de la pulpe. Le budget de cet institut est de 25 millions de dollars par an et provient pour moitié des membres industriels (environ 50). L'institut a trois missions : académique (formation des futurs cadres scientifiques de l'industrie en collaboration avec *Georgia Institute of Technology*) de recherche (développement d'une série d'objectifs de recherche orientés vers les besoins des industriels) et de transfert de technologie (d'ores et déjà, ce bureau créé en 1997 est responsable du démarrage de la Fluidix Microformic Systems⁴⁶ et du développement commercial de deux technologies par ABB et Beloit).

De manière identique, le *Tree Genetic Engineering Research Cooperative* (TGERC⁴⁷) de l'*Oregon State University* est basé sur le principe de la collaboration avec l'industrie. Il a été créé en 1994, sur le principe de la participation (\$25000 par an) dans le but de développer des technologies. Un comité scientifique évalue les progrès et décide de la recherche à accomplir. Les domaines de recherche sont le contrôle génétique de la

⁴⁵ Il est intéressant de noter que le Canada a une approche différente, où leur programme de R&D en foresterie reçoit un soutien important de l'industrie, même si les efforts sont encore concentrés sur les améliorations par QTLs et non pas par modification génétique.

⁴⁶ <http://www.fluidix.com>

⁴⁷ <http://www.fsl.orst.edu/tgerc>

floraison, l'analyse environnementale des plantations d'arbres transgéniques et l'utilisation des transferts de gènes pour la génomique fonctionnelle. Les membres aident à diriger la recherche, sont notifiés des résultats et obtiennent des avantages sur la propriété intellectuelle.

En 1999, un groupement d'industriels de la forêt s'est joint dans une initiative commune. Ce projet impliquait initialement Monsanto⁴⁸, International Paper⁴⁹, Westvaco Corp⁵⁰ et Fletcher Challenge Forests⁵¹. Un partenaire, plus petit en taille, Genesis Research and Development⁵², s'est ensuite ajouté. Le but de cette initiative est de devenir un acteur préminent dans le développement et la commercialisation d'arbres transgéniques pour l'industrie forestière. Il avait été prévu de verser 60 millions de dollars sur 5 ans, dans le but de produire des plantules d'arbres génétiquement améliorés pour la vente commerciale. Cette entreprise a pris le nom d'ArborGen et est implantée à Summerville (SC) dans une région productrice de pins (loblolly pine), à proximité de Westvaco. Ce consortium de laboratoires de recherche a des enjeux communs dans le domaine de la culture de tissus, des arbres transgéniques et de la réglementation. ArborGen n'a pas encore de produits mais travaille sur le long terme en favorisant les technologies pour améliorer la gestion des forêts, une approche facilement compréhensible pour les industries de la forêt. Leur programme génomique s'appuie sur l'expertise de la Nouvelle-Zélande⁵³ et s'oriente essentiellement vers la découverte de nouveaux gènes. Le futur se situe autour du clonage des arbres forestiers, du management des pratiques de sylviculture et en particulier de la meilleure famille aux meilleurs individus. Les trois traits agronomiques que recherchent ArborGen sont la tolérance aux herbicides, les caractéristiques des pulpes et une croissance plus rapide. L'autre start-up créée en 1999 sur le continent nord américain est Cellfor Inc⁵⁴, basée à Victoria (British Columbia, Canada) issue de BC Research⁵⁵

3 – ENJEUX SOCIÉTAUX

La polémique sur les plantes transgéniques qui a fait fureur dans les années 1998 n'ignorera pas la biotechnologie de la forêt et l'utilisation des arbres transgéniques. Trois incidents ont eu lieu au cours de l'année 2001 illustrant toute les précautions à prendre dans l'application de ces technologies aux arbres : en mars, 800 peupliers ont été détruits à *Oregon State University* à Corvallis ; en mai, deux bâtiments ont été brûlés dans une

⁴⁸ Monsanto s'est par la suite retiré de l'initiative

⁴⁹ <http://www.internationalpaper.com>

⁵⁰ <http://www.westvaco.com>

⁵¹ Société de Nouvelle Zélande

⁵² Petite société de Nouvelle Zélande.

⁵³ La Nouvelle Zélande en passant le Forest Act de 1949 s'est positionné très tôt dans la sauvegarde de ces forêts naturelles

⁵⁴ <http://www.cellfor.com>

⁵⁵ <http://www.bcresearch.com/innovation.htm>

exploitation de l'Oregon (*Jefferson Poplar Farm*)⁵⁶ et 3 millions de dollars de dommages ont été infligés au laboratoire de Toby Bradshaw à l'*University of Washington*. Cette polémique a un impact sur les activités scientifiques : détournement de ressources pour augmenter la sécurité des sites de recherche, frilosité des agences de financement fédérales, manque d'intérêts des étudiants en doctorat...

Deux éléments clés doivent être pris en considération avant d'analyser les risques et les bénéfices des plantations d'arbres transgéniques :

- les arbres transgéniques seront principalement utilisés dans des plantations intensives, avec des rotations courtes (3 à 25 ans maximum) pour lesquelles la production de bois est le principal objectif
- les plantations d'arbres transgéniques pourraient aider à augmenter la production de bois et réduire l'exploitation des forêts anciennes

L'analyse générique des risques/bénéfices des plantes transgéniques doit être dissociée de ceux spécifiquement liés à l'utilisation des arbres transgéniques où certains gènes seront utilisés dans des environnements spécifiques et avec des conditions de gestion particulières. Deux problèmes peuvent être perçus comme facteurs de risque :

- La perte de la biodiversité de nos forêts, ce qui comparée aux impacts des activités humaines est relativement peu important et
- La fuite des gènes dans la mesure où les arbres transgéniques sont proches génétiquement et physiologiquement de leurs cousins « type sauvage » et qu'ils produisent de larges quantités de pollen. La stérilité sera l'un des enjeux majeur pour favoriser l'acceptation par le public. L'utilisation d'espèces stériles ou la mise en place de stratégies de gestion de la forêt déjà utilisées par les industriels pourraient réduire ce risque. Le monde de la biotechnologie forestière propose des solutions : utilisation d'hybrides stériles, stratégies de plantation, isolation de nouveaux gènes pour agir sur les gènes ayant des effets néfastes pour l'écosystème, contrôle de la floraison pour consigner les transgènes à la plantation⁵⁷ ...

A l'inverse, certains états, et en particulier la côte ouest des Etats-Unis, du fait de l'impact des considérations environnementales, a un mandat pour réduire la pression sur les sites de forêt naturelle (l'un des rôles de l'*Institute for Forest Genetics*, USDA)

Pour favoriser les relations entre le monde académique, les industriels et la société, l'*Institute of Forest Biotechnology*⁵⁸ a été créé sur le site du *North Carolina Biotech Center*. Son objectif est de répondre aux enjeux sociétaux, éthiques, écologiques et économiques de l'application des techniques de la biotechnologie aux forêts en s'attachant à toutes ses composantes et en imaginant de nouvelles approches d'interactions et de partenariats entre les différents acteurs. Cet institut dirigera ses

⁵⁶ De manière ironique, cette ferme spécialisée dans le croisement des espèces de peuplier à croissance rapide n'a aucune activité dans le domaine des manipulations génétiques utilisant le transfert des gènes.

⁵⁷ Oregon State University

⁵⁸ <http://www.forestbiotech.org>

ressources vers la science et la recherche, les aspects politiques et les impératifs sociétaux. D'ores et déjà, les premières approches incluent les groupes de défense de l'environnement. Ainsi la conférence organisée en 2001 par *Oregon State University*⁵⁹ faisait intervenir des représentants de *Greenpeace* et de *Nature Conservancy*.

4 - CONCLUSIONS

L'intérêt économique des transformations génétiques dans la culture des arbres forestiers commence à apparaître. Le marché des arbres transgéniques pourrait représenter 8% du total général des plantes génétiquement modifiées, un chiffre comparable à celui du riz. Une amélioration de 1 à 2% de la production américaine de bois représenterait des millions de dollars étant donné les échelles d'opération. Cependant, il est intéressant de noter que les choix prioritaires des industriels parmi les caractéristiques d'amélioration de la production de la biomasse sont différents si l'on considère le produit final (pâte à papier, bois...).

Des connaissances en génomique pour plusieurs espèces commerciales d'arbres seront nécessaires au cours de la prochaine décennie. D'ici là, les améliorations attendues dans la production de bois seront essentiellement le résultat de croisements entre arbres, de l'utilisation d'engrais performants et de la sélection de nouveaux lieux de plantation. Cependant, de l'avis de tous les spécialistes, les résultats obtenus par les techniques moléculaires en agro-biotechnologie seront amenés à se reproduire dans l'industrie forestière.

La biotechnologie offre des outils performants pour sélectionner et manipuler des arbres avec la même vitesse et efficacité que pour d'autres organismes. En conséquence, les décennies à venir verront des changements importants et rapides dans les espèces ligneuses utilisées pour produire du papier et des produits du bois. Ainsi, il est possible d'imaginer que des variétés commerciales pourront croître sur une plus grande variété de types de sols et de sites de plantation. Le prix du bois devrait décroître au fur et à mesure que des arbres sont capables de pousser plus vite, produire plus de bois sur des surfaces plus réduites et plus proches des papeteries. Enfin, l'uniformité du bois permettra aussi de réduire les coûts de transformations à chaque étape de la fabrication du papier.

Les laboratoires français qui sont extrêmement bien reconnus aux Etats-Unis comme le constat a pu en être fait lors de ces visites, participent déjà activement à des collaborations avec les Etats-Unis. Toutefois, une opportunité de participer à la réflexion engagée sur les bienfaits sociétaux de la biotechnologie de la forêt s'offre à nos laboratoires. Cette collaboration passerait par l'*Institute for Forest Biotechnology* (NC) demandeuse de partenariats.

⁵⁹ Tree biotechnology in the new millenium. July 22-27 2001. <http://www.fsl.orst.edu/tgerc/iufro2001/>