



Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle - quelque clés

DÉVELOPPEMENT DURABLE



OCDE



**LES BIOTECHNOLOGIES AU
SERVICE DE
LA DURABILITE INDUSTRIELLE
- QUELQUES CLES**

AVANT-PROPOS

Ces « quelques clés » ont été établies sur la base de la publication de l'OCDE intitulée « Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle ». Le Groupe d'étude sur les biotechnologies au service d'un développement durable du Groupe de travail sur la biotechnologie de l'OCDE a contribué à l'élaboration de ce rapport qui a été préparé par le Président du Groupe d'étude, M. John Jaworski, Canada. Nous remercions particulièrement M. Mike Griffiths (consultant auprès de l'OCDE) et tous ceux qui ont contribué aux études de cas présentées dans la publication sur laquelle repose le présent rapport.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
RESUME	5
Introduction	6
Qu'est-ce que la durabilité industrielle ?	6
Vers des industries plus durables	7
Technologie, production plus propre et durabilité	7
Apprendre de la nature: bio-imitation et biotechnologie	10
A propos de la biosécurité.....	11
Quelques exemples d'études de cas	12
Chimie fine	12
Produits chimiques intermédiaires	12
Polymères	13
Agro-alimentaire.....	14
Traitement des fibres	14
Extraction minière et affinage des métaux	14
Énergie.....	15
Enseignements tirés des études de cas	17
Une piste pour un avenir durable : la "bio-économie"	18

RESUME

La biotechnologie permet d'adapter et de modifier les organismes, produits, processus et systèmes biologiques présents dans la nature pour développer des procédés éco-efficaces et des produits non seulement plus rentables mais aussi plus respectueux de l'environnement. Elle offre par ailleurs une gamme de plus en plus large d'outils grâce auxquels l'industrie peut continuer à réduire les coûts et améliorer les performances environnementales des produits bien au-delà de ce qu'aurait permis l'usage de technologies chimiques classiques.

La biotechnologie s'impose aujourd'hui comme une technologie propice au développement industriel durable. L'OCDE a réuni et analysé des études de cas ¹ sur les applications de la biotechnologie dans des secteurs aussi divers que les produits chimiques, les plastiques, l'agroalimentaire, le textile, les pâtes et papiers, l'extraction minière, l'affinage des métaux et l'énergie. Ces études de cas montrent que la biotechnologie peut permettre de réduire non seulement les coûts mais aussi l'empreinte écologique en conservant le même niveau de production. Dans certains cas, les dépenses d'investissement et les coûts d'exploitation ont diminué de 10-50%. Dans d'autres, la consommation d'énergie et d'eau a baissé de 10-80% et l'utilisation de solvants pétrochimiques a pu être réduite de 90%, voire totalement supprimée. Bien souvent, la biotechnologie a permis de développer des produits présentant des propriétés et des avantages en termes de coût et de performances environnementales qui n'auraient pu être obtenus par des procédés chimiques classiques ou par la pétrochimie.

On s'accorde de plus en plus, un peu partout dans le monde, sur la nécessité de mieux gérer et utiliser les ressources naturelles. Une action à grande échelle doit être menée pour réduire les quantités de déchets et la pollution d'origine anthropique. De l'avis général, une industrie plus durable pourrait permettre de réduire l'impact sur l'environnement voire même d'améliorer la qualité de l'environnement tout en produisant des biens et services générateurs d'emplois susceptibles de réduire la pauvreté et d'améliorer la qualité de vie d'une population en pleine expansion.

La mise en place d'une "bio-économie" durable utilisant des bioprocédés éco-efficaces et des ressources biologiques renouvelables apparaît comme l'un des grands défis du 21^{ème} siècle. Le progrès des connaissances dans le domaine de la biodiversité, l'écologie, la biologie et la biotechnologie devrait permettre d'accroître durablement la productivité de la biomasse dans les secteurs forestier et agricole et d'utiliser cette biomasse ainsi que les déchets organiques de façon écologiquement viable et efficace. Sans ces progrès de la science et de la technologie, la transition vers une "bio-économie" pourrait se solder par l'épuisement rapide des ressources renouvelables et une détérioration de l'environnement.

L'évolution vers une économie reposant davantage sur les biotechnologies apparaît riche de promesses tant pour les pays développés qu'en développement. La "bio-économie" offre aux premiers la possibilité d'exploiter leur potentiel technologique national pour assurer leur sécurité énergétique et leurs approvisionnements en produits chimiques. Elle permet aux seconds de "sauter", au moins partiellement, l'ère des combustibles fossiles et de la pétrochimie pour passer directement à celle des bioproduits chimiques et des biocombustibles plus respectueux de l'environnement qui peuvent être produits localement, au profit de l'économie et de la qualité de vie. Une réflexion prospective devra être menée entre l'industrie, les gouvernements, les chercheurs et les défenseurs de l'environnement pour trouver les moyens de construire une économie reposant davantage sur les biotechnologies et capable de générer des avantages économiques, environnementaux et sociaux optimaux pour les pays développés et les pays en développement.

1 . OCDE 2001. Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle (www.oecd.org/sti/biotechnology)

Introduction

Les activités humaines, l'industrialisation, l'urbanisation, l'agriculture, la pêche et l'aquaculture, la foresterie et la sylviculture ainsi que l'extraction pétrolière et minière ont d'importantes répercussions sur l'environnement de la planète et sur la qualité de vie de ses habitants. On s'accorde de plus en plus sur la nécessité d'améliorer la gestion et l'utilisation des ressources naturelles au plan national, régional et mondial et de mener une action de grande envergure pour réduire les quantités de déchets et la pollution d'origine anthropique. Il faudra pour cela abandonner et, si possible, éliminer totalement les modes de production et de consommation non durables. Dans cette optique, la durabilité industrielle suscite un intérêt croissant car elle s'affirme de plus en plus comme un outil indispensable pour parvenir à une telle réduction de l'impact environnemental et améliorer la qualité de vie.

Qu'est-ce que la durabilité industrielle ?

La Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Brundtland 1987) a donné un aperçu des modes de production et de consommation durables dans sa description du développement durable :

“Développement durable : stratégies et actions visant à répondre aux besoins et aspirations du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs”.

En s'inspirant de cette définition du développement durable, le concept de durabilité industrielle peut être défini comme suit :

“L'industrie est durable lorsqu'elle produit des biens et services de façon à répondre aux besoins et aspirations du présent sans compromettre la capacité des générations futures de subvenir à leurs besoins”

Un examen plus approfondi montre que l'industrie est durable lorsqu'elle est :

- **économiquement viable** (elle utilise des ressources naturelles, financières et humaines pour créer de la valeur, de la richesse et des bénéfices)
- **respectueuse de l'environnement** (elle utilise des produits et procédés plus propres et éco-efficients pour prévenir la pollution, l'épuisement des ressources naturelles ainsi que l'appauvrissement de la biodiversité et la disparition des habitats naturels)
- **socialement responsable** (elle respecte des règles d'éthique et maîtrise les différents effets de sa production en lançant des initiatives du type *Responsible Care*)

Cette triple fonction de l'industrie apparaît dans un extrait du rapport Shell 2000 :

“Obtenir d'excellentes performances environnementales n'a pas de sens si aucune richesse n'est créée. De même, la richesse n'a pas de sens dans un environnement détruit. Une société, aussi riche soit-elle, ne saurait être viable sans justice sociale.”

Vers des industries plus durables

La mise en place d'industries durables suppose d'évaluer et d'améliorer en permanence les performances industrielles. L'objectif est de découpler la croissance économique de la dégradation environnementale de façon à rendre l'industrie plus rentable tout en améliorant simultanément la qualité de l'environnement.

La croissance économique génère des emplois et des revenus, des biens et services et des conditions favorables à l'amélioration du niveau de vie d'une population mondiale en pleine expansion. La protection de l'environnement reconnaît la valeur intrinsèque de la nature et des êtres vivants. Elle reconnaît en outre que les organismes présents dans les écosystèmes peuvent fournir des informations et des ressources utiles au développement de produits, procédés et systèmes de production industriels durables. Pour assurer un développement industriel durable, les trois critères (économique, environnemental et social) évoqués ci-dessus doivent être appliqués conjointement pour guider et encadrer la croissance de l'industrie et de l'économie.

En termes simples, le développement industriel durable revient à obtenir plus avec moins ou, si l'on préfère, à accroître l'éco-efficience, c'est à dire à réduire la pollution et, parallèlement, la quantité d'énergie, de matériaux et d'autres intrants nécessaires à la production d'un produit ou service donné. Cet objectif peut être atteint par le biais notamment d'une production plus propre, c'est à dire d'une production reposant sur de nouveaux paradigmes dans laquelle l'innovation vise à développer :

- des **procédés** et systèmes de production :
 - plus économiques et plus rentables parce qu'ils gaspillent moins les matériaux et l'énergie (d'où moins d'émissions de gaz à effet de serre, de polluants organiques persistants et autres).
 - permettant d'utiliser plus largement et plus efficacement les ressources renouvelables (énergie, produits chimiques et matériaux), de réduire notre dépendance vis à vis des ressources non renouvelables, telles que le pétrole, et de limiter les émissions de gaz à effet de serre .
- des **produits** :
 - plus performants, plus durables et qui ne persistent pas dans l'environnement au-delà de leur durée de vie utile.
 - moins toxiques et plus facilement recyclables et biodégradables que les produits classiques qu'ils remplacent.
 - obtenus autant que possible à partir de ressources renouvelables et dont la contribution aux émissions nettes de gaz à effet de serre est minimale.

Technologie, production plus propre et durabilité

L'innovation technologique joue un rôle clé dans la mise en place d'une production plus propre et d'une croissance industrielle durable. Toutefois, il importe de ne pas confondre "plus propre" et "durable". Durable signifie assez propre pour répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des

générations futures de répondre aux leurs. Pour bien faire la distinction entre “plus propre” et “durable” il faut être en mesure d’évaluer et de comparer les performances des différentes techniques de production industrielle.

Les entreprises qui doivent prendre des décisions concernant la mise en œuvre et l’amélioration des procédés de production peuvent développer ces procédés en intégrant les meilleures technologies disponibles. Il existe déjà actuellement des sources d’informations sur les meilleures technologies disponibles, comme par exemple le Bureau européen de prévention et de réduction intégrées de la pollution² ou le Centre international d’échange d’informations pour une production moins polluante³.

Des critères et méthodes scientifiquement validés sont toujours en cours de développement pour évaluer la durabilité à long terme de la production industrielle (voir par exemple le site web de la Table ronde sur l’environnement et l’économie au Canada : www.nrtee-trnee.ca). Il est cependant possible d’estimer ce qui est durable (“assez propre”) du point de vue de l’environnement en se basant sur la situation actuelle et sur certains postulats. On devrait ainsi être en mesure de répondre à la question suivante :

“Si l’on entend assurer la viabilité écologique tout en maintenant une croissance économique soutenue, comment fixer le niveau de performances environnementales auxquels devra satisfaire la technologie actuellement au stade de la R-D au regard des performances de la technologie actuellement utilisée dans l’industrie ?

Pour répondre à cette question, il importe de déterminer quelles devront être les performances environnementales de la technologie si l’on veut maintenir “l’empreinte écologique” (impact environnemental) de la production industrielle à un niveau constant. L’expérience a montré que l’empreinte écologique de l’industrie est directement proportionnelle au niveau de l’activité économique (par exemple, si la production double, l’empreinte écologique double), toutes choses étant égales par ailleurs. En conséquence, si l’on veut éviter un alourdissement de l’impact environnemental des activités industrielles, l’augmentation de la production doit s’accompagner d’une amélioration des performances environnementales, ou de « l’éco-efficience », de la technologie utilisée.

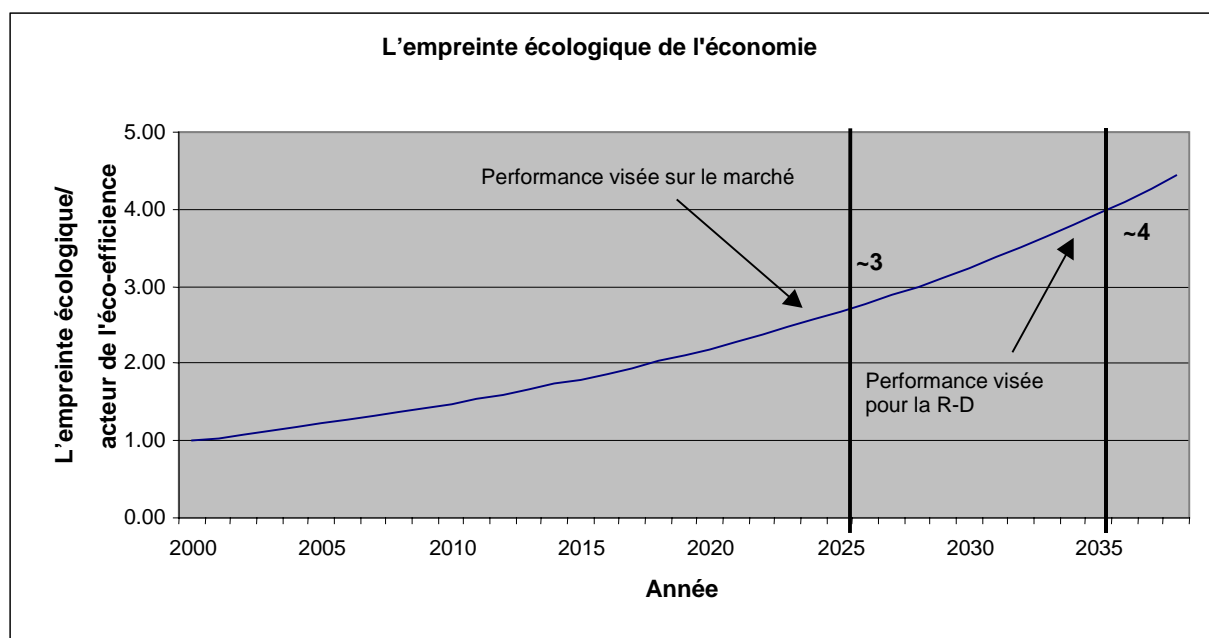
Cela signifie que les nouvelles technologies qui permettent d’améliorer la production doivent aussi permettre une amélioration de l’éco-efficience. Comme on le voit plus en détail dans l’Encadré 1, compte tenu des délais écoulés entre la phase de recherche et de développement des nouvelles technologies et le moment où elles deviennent la norme dans l’industrie, les travaux de R-D menés aujourd’hui doivent viser des performances environnementales bien supérieures au niveau actuel.

Si l’impact environnemental actuel de la production industrielle n’est pas soutenable à terme, les performances environnementales visées par les nouvelles technologies devront être encore plus élevées. Les sections ci-après montrent que les avancées de la technologie, en particulier de la biotechnologie, peuvent contribuer à améliorer les performances environnementales au-delà des facteurs 3-4 cités dans l’exemple de l’Encadré 1.

² Bureau européen de prévention et de réduction intégrées de la pollution (BEPRIP), site web : <http://eippcb.jrc.es>

³ PNUE (1999), Centre international d’échange d’informations pour une production moins polluante, CD Version 1, Programme des Nations Unies pour l’environnement, Division de la technologie, de l’industrie et de l’économie, Paris. Voir aussi le site web : www.emcentre.com/unepweb/.

Encadré 1: Eco-efficience de l'économie : amélioration nécessaire pour maintenir l'empreinte écologique à un niveau constant



1. Le graphique ci-dessus illustre un scénario de croissance de l'économie à long terme. La courbe représente deux fonctions. Elle représente d'une part la progression de l'empreinte écologique, ou impact environnemental, correspondant à un taux de croissance économique de 4% sans modification des performances environnementales de la technologie utilisée. Elle indique par ailleurs par quel facteur devra être multipliée l'éco-efficience si l'on veut conserver le même taux de croissance sans modification de l'empreinte écologique.

2. On constate que pour ramener l'impact environnemental à son niveau de départ :

- les performances environnementales des technologies qui sont prêtes à être mises sur le marché aujourd'hui (en supposant qu'il s'écoulera 25 ans en moyenne avant qu'elles ne deviennent la norme dans l'industrie) doivent être au moins trois fois supérieures aux performances moyennes observées dans l'industrie actuellement (niveau d'émission égal à 33% seulement du niveau actuel).
- les performances environnementales des technologies actuellement au stade de la R-D (en supposant qu'il s'écoulera 35 ans en moyenne avant qu'elles ne deviennent la norme dans l'industrie) doivent être au moins quatre fois supérieures aux performances moyennes des techniques industrielles actuelles (niveau d'émission égal à 25% seulement du niveau actuel).

3. L'Encadré 1 repose sur un certain nombre de postulats :

- l'impact environnemental est directement proportionnel au niveau de l'activité économique.

- la croissance économique (le taux de croissance de la production) est fixé, pour les besoins de la présente analyse, à 4% par an.
- l'amélioration des performances environnementales (ou de l'«éco-efficience») des techniques de production réduit l'empreinte environnementale pour un même niveau d'activité économique.
- pour être adoptée, une technologie doit produire une valeur positive nette importante en termes de performances économiques et/ou environnementales.
- une technologie nouvelle qui trouve aujourd'hui ses premières applications industrielles correspondra dans 25 ans en moyenne au niveau de performance moyen dans l'ensemble de l'industrie.
- les technologies actuellement au stade de la R-D demandent en moyenne 10 ans de développement avant de pouvoir être mises sur le marché, c'est à dire de présenter suffisamment d'intérêt pour commencer à être adoptées par l'industrie.

Apprendre de la nature: bio-imitation et biotechnologie

L'amélioration progressive des technologies de production classiques peut difficilement permettre d'obtenir des performances environnementales quatre fois supérieures au niveau de départ. Une amélioration de cette amplitude passe généralement par un changement de paradigme.

Un nombre croissant d'entreprises trouvent ces nouveaux paradigmes en s'inspirant des produits et processus présents dans les écosystèmes naturels et les organismes qui y vivent. On appelle **bio-imitation** la démarche qui consiste à concevoir des systèmes de production industriels imitant la nature. La **biotechnologie industrielle** désigne l'ensemble des technologies qui mettent à profit l'adaptation et la modification des organismes, processus, produits et systèmes biologiques présents dans la nature aux fins de la production de biens et services.

Les organismes, processus, produits et systèmes présents dans les écosystèmes naturels ont évolué depuis des millions d'années pour devenir extrêmement efficaces. Par exemple, dans les écosystèmes naturels, toute l'énergie est renouvelable puisque la photosynthèse emploie la lumière solaire comme source d'énergie. De même, les substances chimiques et matériaux bio-organiques sont tous renouvelables, biodégradables et recyclés. Il n'existe pas de «déchets» puisque les sous-produits d'un organisme servent à nourrir d'autres organismes. Presque tous, voire tous, les processus métaboliques sont catalysés par des enzymes très spécifiques et efficaces.

La biotechnologie a évolué au cours des 25-30 dernières années et offre aujourd'hui un ensemble d'outils puissants pour développer et optimiser l'efficacité des bioprocédés et les caractéristiques spécifiques des bioproduits. Ces améliorations de l'efficacité et de la spécificité peuvent contribuer très sensiblement à engager l'industrie sur la voie de la durabilité. L'amélioration de l'efficacité permet d'utiliser plus largement les ressources renouvelables sans les appauvrir, sans dégrader l'environnement et sans nuire à la qualité de vie. La biotechnologie peut devenir un outil puissant pour découpler la croissance de la dégradation de l'environnement et de la qualité de vie. Elle peut aussi permettre de concevoir des procédés et produits présentant des caractéristiques qui ne pourraient être obtenues par la chimie classique ou la pétrochimie.

Citons quelques exemples d'applications nouvelles de la biotechnologie qui permettent une amélioration de l'efficacité industrielle :

- Des enzymes extraites de micro-organismes végétaux et animaux présents dans la nature peuvent être utilisées pour catalyser biologiquement des réactions chimiques de façon très efficace et spécifique. Comparés aux procédés chimiques classiques, les procédés biocatalytiques consomment généralement moins d'énergie, produisent moins de déchets et utilisent moins de solvants organiques (qu'il faut ensuite traiter et évacuer).
- Il est possible d'améliorer les performances des enzymes existant à l'état naturel en imitant la sélection et l'évolution naturelles. Ces enzymes peuvent suivre une évolution accélérée (grâce à une technique dite "**évolution moléculaire**") par mutation ou génie génétique et être sélectionnées par un système à haute capacité pour catalyser certaines réactions chimiques et optimiser leurs performances dans certaines conditions, notamment à température élevée.
- Les voies métaboliques des micro-organismes peuvent aussi être modifiées par génie génétique. L'objectif est de faire de chaque cellule un "mini réacteur" hautement performant capable d'effectuer en une seule étape et à haut rendement, ce que la chimie organique pourrait faire en plusieurs étapes et avec un rendement beaucoup plus faible (cette technique est dite "**génie métabolique**").
- Une autre application du génie métabolique consiste à placer selon une configuration optimale les enzymes sur une membrane cellulaire qui, lorsqu'elle est brisée, devient une **surface biocatalytique** présentant les qualités d'efficacité du génie métabolique sans le handicap énergétique que représente le maintien de l'organisme vivant.
- La biomasse végétale peut être traitée et convertie par fermentation et par d'autres procédés en produits chimiques, combustibles et matériaux renouvelables qui ne produisent pas d'émissions nettes de gaz à effet de serre. De plus, ces produits d'origine biologique ("**bioproduits**") sont généralement moins toxiques et moins persistants que leurs équivalents issus de la pétrochimie.
- Des groupes d'entreprises peuvent imiter l'action complémentaire des organismes présents dans les écosystèmes naturels en se réunissant autour de la transformation d'une ressource, par exemple la biomasse, de sorte que les sous-produits de l'une servent de matière première à l'autre. L'énergie, notamment la chaleur produite par les déchets, peut être aussi directement utilisée. Cette démarche est désignée sous le terme de "**écologie industrielle**".
- La capacité de développer des bioprocédés et des systèmes de bioproduction permet d'améliorer considérablement les performances économiques et environnementales. Une installation de fabrication peut ainsi accroître sa rentabilité et sa capacité sans alourdir, et même parfois en réduisant, son impact sur l'environnement.

A propos de la biosécurité

18. Les micro-organismes utilisés dans les bioprocédés industriels ou pour la production d'enzymes industrielles sont sélectionnés de façon à éliminer tout organisme pathogène. Dans les pays de l'OCDE, ces organismes font l'objet de réglementations strictes. Les réglementations relatives à l'hygiène du travail fixent aussi les conditions de leur manipulation sur le lieu de travail et, après leur utilisation, ils sont inactivés par stérilisation. Les matières organiques obtenues sont généralement compostées. L'ADN et les protéines sont fragmentés et le compost peut être utilisé comme engrais pour maintenir le taux de matière organique dans le sol.

Quelques exemples d'études de cas

Le Groupe d'étude de l'OCDE sur la biotechnologie au service d'un développement industriel durable a récemment publié un rapport intitulé "Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle". Ce rapport présente des études de cas illustrant comment des entreprises de secteurs très divers ont tiré parti de la biotechnologie pour réduire leurs coûts et l'impact sur l'environnement de leurs activités de production. On trouvera ci-après un résumé de ces études de cas.

Chimie fine

Étant donné le coût du développement de nouveaux bioprocédés et bioproduits, il n'est pas étonnant que la biotechnologie industrielle trouve une partie de ses premières applications dans l'industrie pharmaceutique et dans le secteur de la chimie fine où la valeur des produits permet de supporter le coût du développement technologique.

On sait depuis longtemps que les enzymes peuvent catalyser certaines réactions chimiques de façon hautement efficace et spécifique. Depuis 1970, **Tanabe Seiyaku** (Japon) utilise des enzymes extraites de certains micro-organismes pour produire des acides aminés. Le piégeage des enzymes sur une surface de façon à pouvoir les réutiliser à plusieurs reprises lui a permis de réduire ses coûts de 40%. L'amélioration du système d'immobilisation des micro-organismes pour optimiser la performance des enzymes a par ailleurs permis de multiplier par 15 la productivité (c'est-à-dire le rapport entre la quantité produite et la matière première consommée), d'où une réduction massive des coûts mais aussi des quantités de déchets.

Les enzymes agissent généralement en solution aqueuse ce qui permet de supprimer les solvants organiques employés dans les procédés chimiques classiques, qu'il faut ensuite recycler ou éliminer par incinération. **Biochemie** (Allemagne), qui est une filiale de Novartis, a développé un procédé de catalyse enzymatique pour fabriquer un antibiotique, la céphalosporine. L'efficacité des enzymes a été optimisée en modifiant génétiquement les micro-organismes qui les produisent. Comparé au procédé chimique classique, le procédé enzymatique génère 100 fois moins de solvants résiduels destinés à être incinérés, ce qui réduit à la fois son coût de production et son impact potentiel sur l'environnement.

Le génie métabolique est une technique qui consiste à modifier génétiquement un micro-organisme pour y intégrer toutes les étapes d'une série de réactions enzymatiques conduisant à un produit particulier, puis à utiliser le métabolisme cellulaire pour lancer la réaction. La cellule se transforme ainsi en mini-réacteur hautement performant capable de synthétiser ce produit. **Hoffmann La-Roche** (Allemagne) utilise actuellement un micro-organisme dont le métabolisme a été modifié pour produire de la vitamine B₂. Ce laboratoire a ainsi réussi à ramener à une étape un procédé chimique qui en comprenait autrefois six. Les quantités de matières premières non renouvelables utilisées ont diminué de cette façon de 75%, les émissions de composés organiques volatils dans l'air et l'eau, de 50% et les coûts d'exploitation, de 50%. De même, **DSM** (Pays-Bas) a utilisé des micro-organismes modifiés par génie métabolique pour réduire de 3 à 7 fois les quantités de déchets issus de la fabrication de la céphalexine. Cette entreprise a pu ainsi réduire ses coûts de production et peut désormais soutenir la concurrence sur les marchés internationaux.

Produits chimiques intermédiaires

D'autres études de cas montrent que lorsqu'une biotechnologie a été développée et maîtrisée dans un domaine, des applications latérales peuvent apparaître dans d'autres. Ainsi, les biotechnologies

développées à chers deniers dans l'industrie pharmaceutique et dans le segment chimie fine de l'industrie chimique peuvent être adaptées et appliquées à un moindre coût pour obtenir des produits de moindre valeur, notamment des produits chimiques intermédiaires utilisés pour fabriquer d'autres produits chimiques ou plastiques.

L'acide S-chloropropionique est un produit chimique intermédiaire utilisé dans la synthèse de certains herbicides. Le "S" indique que la molécule est chirale, c'est à dire qu'elle existe sous forme de deux isomères asymétriques (l'autre isomère est la forme "R"). L'isomère "S" est la forme biologiquement active. Les procédés chimiques classiques utilisés pour séparer les molécules chirales demandent souvent beaucoup d'énergie ou nécessitent d'utiliser d'autres produits chimiques dont il faut ensuite se débarrasser. La méthode biologique de séparation des molécules chirales utilise un micro-organisme qui dégrade sélectivement l'un des deux isomères en laissant l'autre sous une forme pratiquement pure. **Avecia** (Royaume-Uni) a mis au point un bioprocédé permettant d'obtenir de l'acide S-chloropropionique pur à l'aide de bactéries *Pseudomonas* qui dégradent sélectivement les molécules R. La mutagenèse, la sélection et l'adoption de modes de fermentation sophistiqués ont permis de multiplier par quatre la productivité, et l'utilisation d'un organisme génétiquement modifié pour optimiser les performances a encore accru la productivité d'un facteur 5. Le bioprocédé entraîne une réduction non seulement des coûts de production mais aussi des quantités de sous-produits résiduels qu'il faut traiter et éliminer.

Mitsubishi Rayon (Japon) produit de l'acrylamide, substance chimique utilisée dans la production de polymères acryliques. Le procédé chimique classique de production de l'acrylamide à partir d'acrylonitrile se fait à haute température à l'aide d'un catalyseur à base de cuivre ou d'acide sulfurique. Mitsubishi Rayon a mis au point un bioprocédé qui utilise une enzyme existant à l'état naturel, la nitrile hydratase, pour catalyser la conversion de l'acrylonitrile en acrylamide. La performance et le rendement de cette enzyme ont été optimisés par modification génétique du micro-organisme produisant naturellement l'enzyme. Le procédé enzymatique permet de réduire de 80% la consommation d'énergie, d'abaisser les coûts et d'obtenir une acrylamide plus pure que le procédé chimique classique.

Polymères

Le procédé classique de fabrication de certains polyesters comporte une réaction catalysée par du titane ou de l'étain à haute température (200°C) et utilise des solvants et des acides inorganiques. **Baxenden Chemicals** (Royaume-Uni) a mis au point un bioprocédé qui utilise une enzyme, la lipase, tirée de la levure *Candida antarctica* pour catalyser la réaction de polymérisation à une température beaucoup moins élevée (60°C). Le gène de la lipase a été transféré dans une souche industrielle génétiquement modifiée de *E. coli* afin de réduire le coût de production de l'enzyme. Comparé au procédé classique, le procédé de polymérisation catalysé par l'enzyme élimine l'utilisation de solvants organiques et d'acides inorganiques et permet d'économiser environ 2000 mégawatts chaque année lorsqu'il est utilisé à l'échelle industrielle. Le bioprocédé permet de produire des polymères à chaînes plus uniformes, dont le point de fusion se situe dans une fourchette plus étroite que celle du polyester classique, ce qui lui confère une plus grande valeur comme adhésif fusible à chaud. Le bioprocédé enzymatique présente donc des avantages à la fois environnementaux et économiques.

Cargill Dow LLC (États-Unis) a mis au point l'acide polylactique ou polylactide (PLA), un biopolymère dont la fabrication fait appel à des bioprocédés (issus de la biotechnologie) non seulement économes en énergie et en matières premières, mais qui utilisent également comme matière de base une ressource agricole renouvelable, le maïs⁴. Le PLA est non seulement recyclable, mais il est aussi biodégradable et peut être composté. Il peut remplacer certains plastiques comme le nylon, le PET, le

4 . Maïs en europe.

polyester et le polystyrène dans plusieurs applications et l'analyse de son cycle de vie a montré qu'il permet de réduire de 20 à 50% la quantité d'énergie fossile utilisée pour ces applications ; son coût reflète les faibles coûts d'énergie et de matières premières inhérents à sa fabrication. A moyen terme, les progrès de la biotechnologie permettront de produire du PLA à partir de la cellulose contenue dans les sous-produits agricoles et forestiers. De cette façon, le plastique piégera le carbone prélevé dans l'air par les plantes et les arbres, d'où une réduction nette des émissions. Cargill-Dow a construit une usine dans le Nebraska, États-Unis, qui produira chaque année 140 000 tonnes de PLA.

Agro-alimentaire

L'industrie agroalimentaire utilise souvent de grandes quantités d'eau et produit de grandes quantités de déchets organiques. La biotechnologie peut contribuer à réduire la consommation d'eau et la production de déchets organiques. Par exemple, **Pasfrost** (Pays-Bas) a mis au point dans son installation de transformation des légumes un système de traitement biologique de l'eau, qui a permis de réduire la consommation de 50%, et de faire sensiblement baisser les coûts. De même, **Cereol** (Allemagne) utilise un système enzymatique pour démulaginer les huiles végétales pendant la purification après l'extraction. Comparé au procédé classique de démulagination qui utilise de l'acide sulfurique, de l'acide phosphorique, de la soude caustique et de grandes quantités d'eau, le système enzymatique permet d'éliminer le traitement au moyen de bases et d'acides forts, de réduire de 92% la quantité d'eau utilisée et de 88% les boues résiduelles, et d'obtenir une réduction globale des coûts de 43%.

Traitement des fibres

Dans le secteur des textiles et du papier, le blanchiment et le traitement des fibres naturelles demandent de grandes quantités d'énergie, d'eau et de produits chimiques. L'utilisation d'enzymes peut contribuer à réduire le coût de ces intrants de même que leur impact sur l'environnement.

Par exemple, **Windel** (Pays-Bas) a adopté un procédé enzymatique pour réduire l'énergie et le temps nécessaires pour éliminer le peroxyde d'hydrogène utilisé pour blanchir les textiles avant les opérations de teinture. Ce procédé a permis de réduire la température et le volume du second lavage de 80-95°C à 30-40°C, d'où une économie d'énergie de 9 à 14%, une économie d'eau de 17 à 18% et une réduction globale des coûts de 9%. Ces économies ont une grande importance dans le secteur extrêmement concurrentiel qu'est l'industrie textile et où les marges sont généralement assez faibles.

Domtar (Canada) a commencé à utiliser une enzyme, la xylanase, fournie par **Iogen Corporation** (Canada), comme brillanteur de pâte à papier (ce procédé est appelé "**bio-blanchiment**"). Cette enzyme ouvre la structure de la lignine de la pâte de bois, ce qui permet de réduire de 10-15% la quantité de dioxyde de chlore nécessaire pour atteindre le niveau de brillance recherché. Iogen a réduit ses coûts de production et amélioré les performances de la xylanase en modifiant génétiquement le champignon dont elle est extraite. La xylanase a aussi permis à Domtar de réduire de 60% la quantité de chlore lié à des composés organiques dans les eaux résiduelles et de 10 à 15% le coût des agents chimiques de blanchiment. En adoptant la xylanase, **Oji Paper** (Japon) a obtenu des réductions similaires des quantités d'agents de blanchiment nécessaires et des quantités de chlore lié à des composés organiques dans les eaux résiduelles. De plus, cette entreprise produit elle-même sa xylanase sur son site par fermentation, ce qui lui permet de réduire encore ses coûts d'intrants.

Extraction minière et affinage des métaux

Billiton (Afrique du Sud) a mis au point un bioprocédé (“**biolixiviation**”) pour extraire le cuivre de minerai sulfuré. Le bioprocédé utilise des bactéries présentes dans la nature pour oxyder le soufre et le fer contenus dans le minerai à température ambiante. Dans le procédé classique utilisé pour isoler le cuivre, le minerai extrait doit être transporté dans un four de fusion où les impuretés sont éliminées à haute température. La biolixiviation a l’avantage d’être pratiquée in situ, ce qui réduit les coûts de transport et d’énergie et prévient l’émission dans l’atmosphère de grandes quantités d’oxydes de soufre, d’arsenic et de métaux toxiques provenant des fours de fusion. Une fois le cuivre extrait de la solution acide de lixiviation, celle-ci est neutralisée et les substances toxiques telles que l’arsenic sont fixées sous une forme stable et stockées sur le site minier. Le procédé de biolixiviation permet de traiter des minerais pauvres et des minerais contenant de l’arsenic qui ne pourraient être traités efficacement par fusion à haute température. Les coûts des équipements de biolixiviation sont inférieurs de 25% aux coûts de construction d’un four à fusion. Entre 20 et 25% de la production de cuivre mondiale sont actuellement obtenus par biolixiviation.

Budel Zinc (Pays-Bas) fait partie des grands producteurs de zinc. Les effluents acides de ses raffineries de zinc contiennent du zinc et d’autres métaux (étain, cuivre, nickel, manganèse, chrome, plomb et fer). Le procédé classique utilisé pour traiter ces effluents consiste à les neutraliser avec de la chaux ou du calcaire, ce qui produit d’importantes quantités de gypse chargé de métaux lourds. Pour traiter ses effluents, Budel a développé un bioprocédé utilisant des bactéries sulfatoréductrices pour piéger et recycler le zinc et d’autres métaux présents dans les effluents sous forme de précipité de sulfure métallique. Ce précipité est réintroduit dans le cycle de production. Ce procédé a permis de réduire de 10 à 40 fois les concentrations de métaux lourds dans les effluents de la raffinerie et de ne plus produire de gypse résiduaire contaminé contenant des métaux qui font partie des déchets solides dangereux.

Énergie

Dans le secteur de l’énergie, la biotechnologie trouve des applications aussi bien dans le segment combustibles fossiles classiques que dans le segment énergies renouvelables.

Les combustibles fossiles classiques sont généralement extraits de gisements souterrains. Le forage des puits de pétrole nécessite d’utiliser des substances appelées fluides ou boues de forage. Ces substances servent à lubrifier le foret et les tiges de forage et à maintenir le puits ouvert. Les fluides de forage déposent une couche peu perméable (dite “gâteau”) à la surface du puits pour limiter les fuites du fluide de forage dans la formation pétrolifère et à prévenir l’invasion de solides dans les zones de production. Une fois que le puits a atteint la profondeur désirée, cette couche peu perméable doit être enlevée afin de maximiser le taux de production. Les fluides de forage employés traditionnellement sont des boues – dispersions d’argile dans de l’eau ou du pétrole, les argiles conférant la viscosité requise et le pétrole servant de lubrifiant. Ces boues posent deux types de problèmes : (i) le pétrole qu’elle contiennent peut avoir un impact négatif sur l’environnement et doit être traité et (ii) l’acide puissant qu’il faut utiliser pour éliminer le “gâteau” est toxique pour l’environnement, corrode les équipements et n’élimine pas uniformément cette barrière.

M-I et British Petroleum Exploration (Royaume-Uni) utilisent actuellement des fluides de forage contenant un mélange de polymères bio-organiques tels que le xanthane, qui leur confère la viscosité, et d’amidon ou de cellulose, qui servent de liant. La formulation contient aussi un solide inerte appelé agent de support composé de particules dont la taille permet d’obstruer les pores de la roche forée. Cette formulation est non toxique et élimine les problèmes posés par les boues classiques : (i) elle ne contient pas de pétrole ou d’autres substances nécessitant un traitement avant évacuation dans l’environnement ; et (ii) les enzymes utilisées pour éliminer le “gâteau” outre qu’elles sont plus efficaces, ne corrodent pas les équipements et ne présentent pas de risques pour l’environnement.

Grâce à la biotechnologie, les caractéristiques de ces enzymes (cellulase, hémicellulase, amylase et pectinase) ont été améliorées pour mieux répondre aux conditions des puits de forage. Les fluides de forage bio-organiques commencent seulement à être utilisés mais leurs performances apparaissent déjà satisfaisantes dans de nombreux cas et les économies réalisées vont de 75 000 à 83 000 USD par puits foré.

L'éthanol est un carburant renouvelable dont la production se développe en réponse à la demande de carburants à faibles émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur des transports. L'éthanol est produit en fermentant des sucres (du glucose, notamment) à l'aide de levure de bière. Ces sucres peuvent provenir d'amidon de maïs mais, compte tenu de l'énergie nécessaire à la production de maïs, la réduction nette des émissions de GES découlant du remplacement de l'essence par de l'éthanol issu du maïs ne dépasse pas 40 à 50%. Si le sucre utilisé pour produire l'éthanol est tiré de la cellulose du bois ou de déchets végétaux, la réduction nette des émissions de GES peut atteindre en revanche 60 à 70%. Il apparaît donc nécessaire, dans l'optique des émissions de GES, de favoriser la production d'éthanol à partir de matières cellulosiques. Cependant, la lignine présente dans les plantes ligneuses peut empêcher la conversion complète de la cellulose en sucres fermentescibles. **Iogen Corporation** (Canada) a mis au point un procédé utilisant des enzymes (cellulases) qui optimisent la conversion de la cellulose en sucres fermentescibles. Le rendement et l'activité de la cellulase ont été optimisés grâce à la biotechnologie. Iogen cherche actuellement à appliquer la technologie à une plus grande échelle et on a des raisons de penser que l'éthanol produit de cette façon pourra concurrencer l'essence classique si le prix du pétrole reste aux environs de 25 USD le baril.

Enseignements tirés des études de cas

Plusieurs conclusions d'ordre général peuvent être tirées des études de cas :

- i.* L'application de la biotechnologie dans un large éventail de secteurs industriels (produits chimiques, plastiques, agro-alimentaire, traitement des fibres naturelles, extraction minière et énergie) a eu invariablement des retombées économiques et environnementales positives grâce à l'adoption de procédés moins coûteux et plus respectueux de l'environnement que les procédés classiques auxquels ils se substituent. Le recours à la biotechnologie a contribué, de fait, à un découplage de la croissance économique de la dégradation de l'environnement.
- ii.* Le recours à la biotechnologie pour accroître l'éco-efficience des produits et procédés industriels peut favoriser l'adoption de modes de production plus durables dans un grand nombre d'industries. Pour ce faire, il importe de poursuivre le développement des biotechnologies et des technologies connexes et de mettre en place les politiques d'accompagnement nécessaires pour s'acheminer vers une production plus durable.
- iii.* Les principaux moteurs de l'adoption de bioprocédés et bioproduits plus efficaces sont les économies qu'elle permet de réaliser et l'amélioration de la qualité ou des performances des produits ; les considérations d'environnement ont leur importance mais (au moins dans les études de cas) n'arrivent qu'après.
- iv.* Pour mettre à profit l'avancée des biotechnologies/bioprocédés, il importe que les entreprises gèrent de façon constructive le développement technologique en utilisant des outils d'évaluation des performances économiques et environnementales de la technologie au stade du développement. Il serait utile de disposer à cette fin d'outils d'évaluation plus performants, plus faciles à utiliser et applicables à des stades plus précoces du processus de développement.
- v.* Même les grandes entreprises risquent de ne pas disposer en interne de toutes les compétences nécessaires pour développer des bioproduits et bioprocédés plus performants, c'est pourquoi la collaboration avec les universités, la recherche publique et d'autres entreprises peut jouer un rôle non négligeable dans l'introduction de ces produits et procédés.
- vi.* L'introduction d'un nouveau paradigme technologique dans une entreprise est souvent précédée d'une longue période de gestation mais les délais peuvent être considérablement raccourcis dans les cycles ultérieurs de développement.
- vii.* L'application de la biotechnologie au service du développement de produits et de procédés industriels n'en est toujours qu'à ses balbutiements mais les avantages économiques et environnementaux de cette technologie devraient encore augmenter à mesure qu'elle sera mieux connue et mieux diffusée et qu'elle gagnera de nouveaux secteurs au cours des prochaines décennies.

Une piste pour un avenir durable : la “bio-économie”

Les études de cas que l’on vient d’évoquer montrent que la biotechnologie est un outil efficace pour parvenir au double objectif de croissance économique et de protection de l’environnement. L’eco-efficience des bioproduits et bioprocédés peut servir de point de départ au passage de nombreux secteurs industriels à des modes de production plus durables.

Cependant, ces applications se présentent en ordre dispersé comme “mille petits points de lumière”, sans principe directeur, ni orientation stratégique. Or, une orientation stratégique apparaît nécessaire si l’on veut éviter d’investir des ressources dans le développement de systèmes de production toujours plus propres sans jamais parvenir à les rendre “assez propres”, c’est à dire durables. Le passage à une économie mettant plus largement à profit les matières premières renouvelables (“bio-économie”⁵) pourrait être ce principe fédérateur qui manquait jusqu’ici.

Comme on le voit au tableau 1, le maintien des procédés classiques qui ne sont pas éco-efficents, conjugué à l’emploi de matières premières non renouvelables se traduit par une pollution persistante et l’épuisement des ressources. L’utilisation conjuguée de ces procédés et de ressources renouvelables risque de conduire à l’épuisement de ces ressources à mesure que l’économie mondiale se développe et que la demande augmente. Si l’on utilise des procédés de production plus propres avec des ressources non renouvelables, la durée de vie de ces ressources est prolongée, mais on ne fait que repousser le moment où elles seront inévitablement épuisées. L’utilisation conjuguée de ressources renouvelables et de procédés éco-efficents plus propres apparaît comme le meilleur gage de durabilité.

Tableau 1

Choix des procédés et matières premières – Implications pour la durabilité

	Procédés classiques	Procédés plus propres
Matières premières non renouvelables	Statu quo – pollution; épuisement rapide des ressources	Allongement de la durée de vie des ressources – “l’inévitable est retardé”
Matières premières renouvelables (ex : biomasse)	Amenuisement des ressources renouvelables	Perspectives optimales de durabilité

19. La mise en place d’une économie durable reposant plus largement sur l’utilisation des ressources de carbone renouvelables et de bioprocédés éco-efficents (“bio-économie”) est l’un des grands enjeux stratégiques du 21^{ème} siècle.

⁵ La “bio-économie” utilise des ressources biologiques renouvelables (agricoles, forestières et marines) et des procédés éco-efficents (y compris des bioprocédés) pour générer des bioproduits durables, des emplois et des revenus.

A l'heure actuelle, l'économie mondiale est largement tributaire des stocks de carbone fossile et de pétrole dont elle tire son énergie, ses produits chimiques et bon nombre de ses matériaux. Les carburants et combustibles utilisés pour le transport et le chauffage proviennent du pétrole d'où sont également tirés les produits chimiques synthétiques employés pour fabriquer des plastiques, des peintures, des colorants, des adhésifs et de très nombreux autres produits industriels et biens de consommation utiles. Cette orientation a permis une croissance économique forte, créé des emplois et littéralement transformé la société mondiale. Mais cette croissance a un prix : l'ère pétrochimique a aussi entraîné une pollution massive de l'air, de l'eau et du sol ainsi que des émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. Le pétrole est par ailleurs une ressource limitée qui s'épuise et dont le prix connaît actuellement de fortes augmentations et fluctuations. Le niveau actuel de la consommation mondiale d'énergie, de la production et de la croissance industrielle ne pourra être maintenu à terme car il suppose l'exploitation continue des stocks de carbone fossile qui, comme on le sait, ne sont ni inépuisables ni renouvelables.

Le monde n'a pas toujours été tributaire du pétrole. Il existait autrefois une "bio-économie" traditionnelle qui assure encore à l'heure actuelle notre approvisionnement en denrées alimentaires, aliments du bétail, fibres et bois. Jusqu'en 1920, bon nombre de produits industriels étaient aussi des bioproduits, qu'il s'agisse des combustibles, des produits chimiques ou des matériaux tirés de la biomasse, tels que le bois et les productions végétales. L'offre abondante de pétrole à bas prix a changé la donne. Toutefois, comme le montrent les études de cas citées plus haut, les progrès de la technologie, et de la biotechnologie en particulier, rendent aujourd'hui un « retour vers le futur » économiquement viable et écologiquement avantageux et permettent dès maintenant de compléter, et peut-être à terme de remplacer, le pétrole par de la biomasse, matière première renouvelable essentiellement tirée des plantes.

Grâce aux progrès des connaissances sur la biodiversité, l'écologie, la biologie et la biotechnologie, il est possible aujourd'hui d'accroître durablement la productivité de la biomasse forestière et agricole et d'utiliser cette biomasse et les déchets organiques de façon durable et hautement efficace. Sans ces progrès de la science et de la technologie, la transition vers une "bio-économie" entraînerait un épuisement rapide des ressources renouvelables et une nouvelle détérioration de l'environnement. Aujourd'hui, les avancées de la science et de la technologie rendent possible l'avènement d'une économie dans laquelle le développement industriel et la création d'emplois ne sont pas incompatibles avec la protection de l'environnement et la qualité de vie. Mettre en place une telle société pose un véritable défi et il nous faudra disposer d'outils efficaces pour évaluer les technologies, procédés et produits dans l'optique de leur durabilité, de même que les politiques qui favorisent les modes de production et de consommation durables.

Les sciences de la vie, et en particulier la biotechnologie, offriront des outils essentiels pour relever ce défi. Par exemple, les programmes américains *Vision*⁶ et *Technology Roadmap*⁷ for Plant/Crop Based Renewable Resources 2020 donnent des orientations sur la manière de concevoir, planifier et mettre à exécution ce projet en fixant des objectifs de développement technologique à court, moyen et long terme :

- Sélection et développement de variétés de plantes et d'arbres à valeur ajoutée pour des applications classiques et industrielles.
- Production agricole et sylvicole durable à haut rendement.

⁶ US Department of Energy (1998), *Vision for Plant/Crop Based Renewable Resources 2020*. Site web : www.oit.doe.gov/agriculture/pdfs/vision2020.pdf.

⁷ US Department of Energy (1999), *The Technology Roadmap for Plant/Crop Based Renewable Resources 2020*. Site web : www.oit.doe.gov/agriculture/pdfs/ag25945.pdf.

- Récolte et traitement éco-efficients du point de vue de l'environnement.
- Utilisation durable des produits obtenus.
- En fin de cycle, retour des résidus à l'environnement pour maintenir le taux de matière organique dans le sol et assurer sa fertilité.

La « bio-économie » apparaît riche de promesses tant pour les pays développés qu'en développement. Elle offre aux premiers la possibilité d'exploiter leur potentiel technologique national pour assurer leur sécurité énergétique de façon à surmonter les grands bouleversements économiques et sociaux qu'entraîneront les fluctuations de l'offre et des prix de l'énergie et des produits pétrochimiques à mesure que les réserves de ces ressources non renouvelables iront décroissant. Elle leur permettra en outre de diversifier et de développer l'emploi en milieu rural.

La biotechnologie permettra à un certain nombre de pays en développement de “sauter” (au moins partiellement) l'ère des combustibles fossiles et de la pétrochimie pour passer directement à celle des bioproduits chimiques et des biocombustibles. Les bioproduits sont moins toxiques et plus facilement biodégradables que leurs équivalents pétrochimiques et peuvent être fabriqués à partir de ressources cultivées localement, d'où une plus grande autonomie, une économie plus forte et une meilleure qualité de vie.

Toutefois, si une telle évolution doit se produire au cours du 21^{ème} siècle, il n'est pas réaliste de penser, en dépit des avantages économiques, environnementaux et sociaux attendus, qu'une nouvelle « révolution verte » balayera spontanément les industries existantes. Le passage à une “bio-économie” pourrait marquer un changement au moins aussi importantes que le développement de la pétrochimie au 20^{ème} siècle. Toutefois, les valeurs de la société en 2001 ne sont plus les mêmes qu'en 1901. La transition devra par conséquent être gérée avec beaucoup de discernement, notamment parce qu'elle mettra en balance des problèmes tels que la biotechnologie et les OGM, la préservation de la biodiversité, le changement climatique, la mondialisation, la croissance économique, le développement durable et la qualité de vie.

Compte tenu de l'interdépendance de tous ces aspects, les gouvernements, l'industrie et la société civile pourraient être confrontés à des problèmes et défis complexes à mesure qu'ils chercheront à optimiser les avantages économiques, environnementaux et sociaux, tout en favorisant et en encourageant le développement d'une “bio-économie” dans leur pays. Une réflexion prospective devra être menée par tous les acteurs si nous voulons être en mesure d'anticiper les principaux problèmes et les grandes décisions qu'il leur faudra prendre à mesure qu'ils s'engagent sur cette voie. D'autres travaux sur ces questions sont en cours dans plusieurs pays et enceintes internationales notamment l'OCDE, la CNUCED et le PNUE.